



TUGAS AKHIR - TM 141585

## **Studi Numerik Karakteristik Pembakaran dengan *Variasi Mass Flow Rate Carrier Air dan Coal* pada *Start Up Burner***

Rahadyan Hantyo  
NRP 2108 100 061

DOSEN PEMBIMBING  
Ir. Eddy Harmadi T., ME.

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2015



FINAL PROJECT - TM 141585

# **Numerical Study of Combustion Characteristics in a Start Up Burner with Carrier Air and Coal Mass Flow Rate Variations**

Rahadyan Hantyo  
NRP 2108 100 061

Advisor Lecturer  
Ir. Eddy Harmadi Tjokrowisastro, ME

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute Of Technology  
Surabaya  
2015

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK PEMBAKARAN  
DENGAN VARIASI MASS FLOW RATE COAL DAN  
CARRIER AIR PADA RANCANGAN START UP  
BURNER**


**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Konversi Energi  
Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Rahadyan Hantyo**  
NRP: 2108 100 061

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Ir. Eddy Harmadi T., ME..... (Pembimbing)  
NIP.195003141978031001
  2. Bambang Arip D. ST., M.Eng., Ph.D..... (Penguji I)  
NIP.197804012002121001
  3. Ir. Witantyo MEng., Sc..... (Penguji II)  
NIP. 196303141988031002
  4. Dr. Bambang Sudarmanta ST., MT..... (Penguji III)  
NIP.197301161997021001
- 

**SURABAYA  
Januari 2015**

## **Studi Numerik Karakteristik Pembakaran dengan *Variasi Mass Flow Rate Carrier Air dan Coal pada Start Up Burner***

**Nama Mahasiswa** : Rahadyan Hantyo  
**NRP** : 2108100061  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI – ITS  
**Dosen Pembimbing** : Ir. Eddy Harmadi T. , ME.

### **ABSTRAK**

Harga BBM yang terus meningkat membuat biaya operasi PLTU menjadi tinggi karena masih menggunakan BBM untuk start up. *Start up burner* digunakan untuk memanaskan *boiler* sampai ke temperatur operasi sehingga batubara yang masuk *boiler* dapat terbakar. Untuk memanaskan *boiler* hingga temperatur operasinya, *start up burner* membutuhkan waktu yang lama dan BBM dalam jumlah yang besar, sehingga perlu dilakukan pengembangan desain pada *start up burner* tersebut dengan menambahkan sistem pemasukan udara dan *pulverized coal* untuk mengurangi konsumsi BBM. Pada tugas akhir ini direncanakan untuk memodelkan *start up burner* kombinasi yang dapat membakar batu bara langsung dengan bantuan sedikit nyala api dari *oil burner*, *mass flow rate carrier air*, dan *pulverized coal* dan udara pada *burner* tersebut sangat menentukan hasil pembakaran dan nyala api yang terjadi.

Penelitian dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics*(CFD) untuk menganalisa model burner yang sudah dirancang. Pembuatan geometri *burner* menggunakan *software solidworks 2013* dan *Gambit 2.4.6.*, sedangkan untuk simulasi numerik menggunakan *ANSYS Fluent 15.0*. Simulasi yang dilakukan yaitu memasukkan model turbulensi, energy, radiasi, *species materials*, *operating conditions*, *boundary conditions*, *solution*, *initialize*, dan *monitor residual*. Model turbulensi yang digunakan adalah model turbulensi k-ε standard. Material yang digunakan adalah serbuk batubara udara dan BBM.

*Boundary condition* yang ditetapkan yaitu *velocity inlet* untuk *secondary air nozzle*, sedangkan *pulverized coal* dan *carrier air* diatur sebagai *mass flow inlet*. Kemudian untuk pengaturan *outlet* didefinisikan sebagai *pressure outlet*.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini pengoperasian burner dengan perbandingan total udara dan batubara 3 : 1 menghasilkan pembakaran dengan nyala api paling besar dengan panjang nyala 2.23055 meter dan temperature maksimum 1756 K, namun dengan pengoperasian tersebut emisi NOx yang dihasilkan paling besar dimana fraksi massa maksimal NOx mencapai 0.00035, pada pengoperasian burner dengan perbandingan total udara dan batubara 5 : 1 menghasilkan pembakaran dengan nyala api paling besar dengan panjang nyala 1.7433 meter, dengan pengoperasian tersebut emisi NOx yang dihasilkan memiliki fraksi massa maksimal NOx mencapai 0.00075, sedangkan pengoperasian burner dengan perbandingan total udara dan batubara 7 : 1 temperatur yang dihasilkan dibawah 1000 K, maka pengoperasian dengan rasio tersebut tidak dapat digunakan karena temperature yangterlalu rendah walaupun memiliki emisi gas buang yang baik.

***Kata Kunci: Pembakarann, Studi Numerik, Simulasi, CFD***

# **Numerical Study of Combustion Characteristics in a Start Up Burner with Carrier Air and Coal Mass Flow Rate Variations**

**Name** : Rahadyan Hantyo  
**NRP** : 2108100061  
**Departement** : Teknik Mesin FTI – ITS  
**Advisor Lecturer** : Ir. Eddy Harmadi T. , ME

## **ABSTRACT**

The price of fuel continues to increase make the cost of coal-fired power station operation to be high because it still usin fuel to start up process. start up burner used to heat boilers to the temperature of the operation so that coal in the boiler can be burned .Start up burner need a long time and fuel oil in large quantities, so two needs to developing design in start up the burner system by adding the air and pulverized coal to reduce fuel consumption .On this burner model is planned to combine system that can burn coal directly in it with the help of little flame from oil burner ,carrier air and pulverized coal mass flow rate on a burner is very determine the results of combustion and flame happened .

This research is using a method of computational fluid dynamics ( cfd ) to analyze the burner that has been designed. The burner geometry made using *solidworks 2013 and Gambit 2.4.6*, and for numerical simulation *ANSYS Fluent 15.0*. The simulation was using k- $\epsilon$  standard for turbulence model, energy equation, radiation, species, materials, operating conditions, boundary conditions, solution, initialize, dan monitor residual. In materials defining pulverized coal and air. Boundary condition defined as velocity inlet for secondary air nozzle, pulverized coal and carrier air defined as mass flow inlet. And for outlet defined as pressure outlet.

The result obtained from these studies that when the burner operated with afr 3: 1 produced the biggest flame, 2.23055 meter length and the maximum temperature 1756 k, but produces biggest emissions of nox , where the fraction of nox reached 0.00035, with afr 5: 1 it produced flame 1.7433 meters long with the nox that produced reach a maximum of 000075, while afr 7: 1 temperature produced under 1,000 k, and operate the ratio is less well as temperature too low despite having good gas emissions.

***Keyword: Combustion, Numerical study, Simulation, CFD***

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillah* Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, Tuhan semesta alam yang selalu memberi kasih sayang tiada tara pada penulis hingga mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul:

*“Studi Numerik Karakteristik Pembakaran dengan Variasi Mass Flow Rate Carrier Air dan Coal pada Start Up Burner”* Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Ir.Eddy Harmadi.,ME selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
2. Bapak dan Ibu serta Keluarga yang memberi dukungan dan doa hingga penulis bisa menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Witantyo MEng., Sc , bapak Dr. Bambang Sudarmanta ST., MT, bapak Bambang Arip D. ST., M.Eng., Ph.D selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
4. Bapak Djatmiko ichsani selaku Dosen wali penulis, terima kasih atas saran-saran dan kemudahan yang telah bapak berikan selama ini.
5. Rekan satu tim tugas akhir penulis, Toni, Adit, Aldo, dan Bambang yang selalu memberikan dukungan, bantuan dan kerja sama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Cak To, Cak Bud, mas Dani Lab CAE, pak Gianto Workshop Manufaktur, Mas Erdin Lab Pendingin dan Bapak Sutrisno pembimbing di lab. Mekanika Fluida yang telah memberikan saran-saran selama dalam pembuatan alat dan pengambilan data eksperimen.



7. Saudara saudara Asrama ITS
8. Sahabat penulis dan saudara seperjuangan **M51**, terutama yang menemani penulis saat yang lain sudah Wisuda Bimo, Bustan, Iwak, Becong, Esya, Anhom, Bahadur, Bontang Cete, Buntal, Jarakal serta yang tidak bisa disebutkan satu per satu, terima kasih banyak.
9. Rizka Dwi Ramadhani yang selalu sabar dan menghibur penulis.
10. Adik- adik Lab Metalurgi Bilal, Hendra, Galang, Budhita, Yordi, Fira, Zahra, Puput, Donkey, yang memperbolehkan penulis singgah walaupun bukan anggota Lab serta menemani saat perkuliahan, terima kasih.
11. Seluruh Civitas Akademika jurusan Teknik Mesin ITS
12. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Januari 2015

**Penulis**

## DAFTAR ISI

Judul	
Lembar Pengesahan	
Abstrak .....	i
Abstract .....	iii
Kata Pengantar .....	v
Daftar Isi .....	vii
Daftar Gambar .....	x
Daftar Tabel .....	xiv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	4
1.3 Batasan Masalah .....	6
1.4 Tujuan Penelitian .....	6
1.5 Manfaat Penelitian .....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA dan DASAR TEORI .....	9
2.1 Tinjauan Pustaka .....	9
2.2 Dasar Teori .....	16
2.2.1 Boiler .....	16
2.2.1.1 Boiler Furnace .....	11
2.2.1.2 Burner .....	13
2.2.1.3 Waterfall .....	17

2.2.1.4 Primary Air Fan.....	17
2.2.1.5 Force Draft Fan.....	18
2.2.1.6 Steam Drum.....	18
2.2.2 Prinsip Pembakaran.....	18
2.2.3 Perhitungan Stoikiometri .....	20
2.2.4 Laju Massa Batubara (coal feed rate).....	22
2.2.5 Sistem Pembakaran .....	22
2.2.6 Batubara .....	23
2.2.7 Deskripsi RANS Turbulensi Model .....	24
2.2.8 Model Species .....	26
2.2.9 Model Discrete Phase.....	26
<b>BAB III METODOLOGI .....</b>	<b>31</b>
3.1 Tahapan Penelitian.....	31
3.2 Flowchart Penelitian .....	31
3.3 Tahapan Pemodelan dan Simulasi .....	34
3.3.1 Pre-processing.....	34
3.3.2 Processing .....	37
3.3.3 Post-processing .....	44
3.4 Validasi .....	42
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>47</b>
4.1 Analisa Pada Kontur Temperatur .....	47
4.2 Analisa Pada O <sub>2</sub> .....	51
4.3 Analisa Pada CO <sub>2</sub> .....	56

4.4 Analisa Pada Pollutan NO .....	60
BAB V PENUTUP .....	65
6.1 Kesimpulan.....	65
6.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA.....	67
BIOGRAFI	

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 gambar rancangan start up burner .....	3
Gambar 1.2 gambar rancangan start up burner potongan samping .....	3
Gambar 1.3 gambar fin swirl air pada burner.....	4
Gambar 2.1 Skema peralatan pada pengujian tiny burner.....	9
Gambar 2.2 grafik pembakaran burner dengan menggunakan coal dan tanpa menggunakan coal.....	10
Gambar 2.3 Hasil pembakaran dan grafik temperatur pada outlet burner dari pembakaran dengan coal dan tanpa coal .....	11
Gambar 2.4 grafik Unburn Coal, Carbon dan Hydrogen hasil dari pembakaran burner dengan feed rate 4t/h.....	12
Gambar 2.5 grafik temperatur gas terhadap radius burner dengan variasi coal dan tanpa coal .....	13
Gambar 2.6 grafik gas temperatur terhadap radius dari burner pada outlet stage 1 dan stage 2 dengan variasi coal feed rate dan tanpa coal .....	14
Gambar 2.7 kandungan carbon dan hydrogen dan unburnt coal dari hasil dari pembakaran dengan variasi coal feed rate secara radial pada outlet burner .....	15

Gambar 2.8 Ilustrasi proses pembakaran pada tangentially-fired boiler .....	17
Gambar 2.9 Kriteria hasil pembakaran sempurna, baik, dan tak sempurna .....	20
Gambar 2.10 Klasifikasi batubara ( <i>American Standard for testing and materials</i> ) .....	23
Gambar 2.11 Tipe injeksi ‘single’ .....	27
Gambar 2.12 Tipe injeksi ‘group’ .....	27
Gambar 2.13 Tipe injeksi ‘cone’ .....	28
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian .....	33
Gambar 3.2 geometri open chamber.....	35
Gambar 3.3 geometri burner.....	35
Gambar 3.4 Hasil meshing burner tampak samping.....	36
Gambar 3.5 Hasil meshing keseluruhan tampak samping.....	36
Gambar 3.6 Hasil meshing open chamber tampak depan.....	37
Gambar 3.7 Gambar kondisi aktual burner .....	39
Gambar 3.8 gambar pemodelan geometri burner pada simulasi .....	40
Gambar 3.9 gambar pemodelan carrier air dan coal .....	41
Gambar 3.10 boundary condition inlet oil burner .....	41
Gambar 3.11 gambar permodelan open chamber.....	42
Gambar 3.12 garis observasi temperature dan fraksi massa gas buang .....	45

Gambar 3.13 grafik perbandingan panjang nyala eksperimen dan simulai .....	46
Gambar 4.1 Kontur temperatur pada tiap variasi AFR.....	47
Gambar 4.2 grafik temperatur pada garis y center di tiap variasi AFR.....	49
Gambar 4.3 Grafik <i>Volume</i> Nyala Api dari variasi laju aliran massa.....	50
Gambar 4.4 Kontur fraksi massa <i>species</i> O <sub>2</sub> pada tiap variasi AFR.....	51
Gambar 4.5 . Grafik <i>mass fraction</i> O <sub>2</sub> pada garis z1.5 terhadap radius open chamber .....	52
Gambar 4.6 Grafik <i>mass fraction</i> O <sub>2</sub> pada garis z2 terhadap radius open chamber.....	53
Gambar 4.7 Grafik <i>mass fraction</i> O <sub>2</sub> pada garis z2.5 terhadap radius open chamber .....	54
Gambar 4.8 Grafik <i>mass fraction</i> O <sub>2</sub> pada garis z3 terhadap radius open chamber .....	55
Gambar 4.9 Kontur <i>mass fraction</i> CO <sub>2</sub> pada tiap variasi AFR..	56
Gambar 4.10 Grafik <i>mass fraction</i> CO <sub>2</sub> pada garis z1.5 terhadap radius open chamber .....	57
Gambar 4.11 Grafik <i>mass fraction</i> CO <sub>2</sub> pada garis z2 terhadap radius open chamber .....	58



Gambar 4.12 Grafik <i>mass fraction</i> CO <sub>2</sub> pada garis z2.5 terhadap radius open chamber .....	59
Gambar 4.13 Grafik <i>mass fraction</i> CO <sub>2</sub> pada garis z3 terhadap radius open chamber .....	59
Gambar 4.14 Grafik <i>mass fraction</i> CO <sub>2</sub> pada garis z3.5 terhadap radius open chamber .....	60
Gambar 4.15 Kontur <i>mass fraction pollutant NO</i> pada tiap variasi mass flow rate coal dan udara .....	61
Gambar 4.16 Grafik <i>mass fraction</i> NO <sub>x</sub> pada garis z1.5 terhadap radius open chamber .....	61
Gambar 4.17 Grafik <i>mass fraction</i> NO <sub>x</sub> pada garis z2 terhadap radius open chamber .....	62
Gambar 4.18. Grafik <i>mass fraction</i> NO <sub>x</sub> pada garis z2.5 terhadap radius open chamber .....	62
Gambar 4.19 Grafik <i>mass fraction</i> NO <sub>x</sub> pada garis z3 terhadap radius open chamber .....	63
Gambar 4. 20 Grafik <i>mass fraction</i> NO <sub>x</sub> pada garis z3.5 terhadap radius open chamber .....	63

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Perkembangan kapasitas masing-masing pembangkit listrik (2000-2009).....	2
Tabel1.2 Rencana peningkatan kapasitas masing-masing pembangkit sampai dengan tahun 2020 .....	2
Tabel 1.3 variasi mass flow rate untuk validasi simulasi .....	5
Tabel 1.4 variasi mass flow rate untuk percobaan simulasi .....	5
Table 2.1 Klasifikasi batubara ( <i>American Standard for testing and materials</i> ) .....	23
Table 3.1 Variasi mass flow rate coal dan udara carrier yang akan disimulasikan untuk validasi .....	34
Tabel 3.2 Variasi mass flow rate coal dan udara carrier yang akan disimulasikan untuk menguji performa burner.....	34
Tabel 3.3 Nama <i>Boundary Condition</i> Pemodelan Sistem dan Tipenya.....	43
Tabel 3.4 data validasi hasil simulasi dan eksperimen.....	46
Tabel 4.1 Data panjang nyala api dari tiap variasi AFR.....	48
Tabel 4.2 Data volume api hasil simulasi temperatur dari variasi AFR .....	49
Tabel 4.3 Data panjang nyala api dari tiap variasi AFR.....	48

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BIODATA PENULIS**



Penulis yang memiliki nama lengkap Rahadyan Hantyo ini lahir di kota Jakarta pada tanggal 16 Desember 1990. Merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis mulai menuntut ilmu di SD Kaliasin 3 Surabaya (1996-2002), jenjang selanjutnya di SMPN 1 Surabaya (2002-2005), meneruskan studi ke SMAN 2 Surabaya (2005-2008) hingga pada akhirnya melanjutkan pendidikan ke tingkat perguruan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2008 dan mengambil Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS. Di Jurusan Teknik Mesin, penulis memilih Bidang Studi Teknologi Pembakaran dan Bahan Bakar karena ketertarikannya pada bidang ini.

Untuk semua informasi dan masukan dapat menghubungi penulis melalui email, dengan alamat [rahadyanhantyo@gmail.com](mailto:rahadyanhantyo@gmail.com)

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Krisis sumber daya alam, khususnya krisis energi adalah salah satu permasalahan yang belum terselesaikan oleh Indonesia. Krisis energi di Indonesia jelas terlihat pada bahan bakar fosil. Indonesia ditanggguhkan keanggotaannya di OPEC pada tahun 2009, setelah sebelumnya bergabung pada tahun 1962. Berdasarkan *U.S Energy Information administration* Indonesia memiliki pasokan minyak mentah sebesar 3.6 juta barrels pada Januari 2014, menurun dari 4 juta barrels pada awal tahun 2013. Indonesia saat ini mengimpor minyak mentah dan produk olahan, dikarenakan meningkatnya permintaan dalam negeri, dan penurunan produksi minyak, yang berdampak pada melonjaknya harga bahan bakar minyak di pasaran seperti halnya Bahan Bakar Minyak solar. Sebaliknya pada sektor batubara harganya jauh lebih murah dibandingkan BBM, Indonesia merupakan eksportir terbesar di dunia dengan sekitar 75% dari produknya di ekspor. Indonesia memainkan peran penting dalam pasar batubara dunia sebagai pemasok regional untuk pasar Asia khususnya batubara termal yang biasanya digunakan dalam pembangkit listrik saat ini. Pembangunan pembangkit listrik di Indonesia saat ini terus berkembang, hal ini dapat dilihat dari terus bertambahnya kapasitas pembangkit listrik yang tercantum pada data dibawah :

Tabel 1.1 Perkembangan kapasitas masing-masing pembangkit listrik (2000-2009)

Tahun/ Year	PLTA/ Hydro power	PLTU/ Coal fired pp	PLTG/ Gas pp	PLTGU/ Combined cycle pp	PLTP/ Geoth. pp	PLTD/ Diesel pp	PLTMG/ Oil-gas pp	PLT Bayu/ Wind pp	Jumlah/ Total	%
2000	3.015,2	6.770,0	1.203,4	6.863,2	360,0	2.549,8			20.761,7	
2001	3.105,8	6.900,0	1.224,7	6.863,2	380,0	2.585,1			21.058,8	1,43
2002	3.155,2	6.900,0	1.224,7	6.863,2	380,0	2.589,1			21.112,2	0,25
2003	3.167,9	6.900,0	1.224,7	6.863,2	380,0	2.670,4			21.206,3	0,45
2004	3.199,4	6.900,0	1.481,6	6.561,0	395,0	2.911,4	12,0		21.470,4	1,25
2005	3.221,0	6.900,0	2.723,6	6.281,0	395,0	2.994,5	12,0		22.515,1	4,87
2006	3.529,1	8.220,0	2.727,2	7.021,0	395,0	2.941,9	12,0		24.834,2	10,3
2007	3.501,5	8.534,0	2.783,6	7.021,0	415,0	2.956,3	12,0	0,1	25.223,5	1,57
2008	3.504,3	8.764,0	2.496,7	7.371,0	415,0	3.020,9	21,8	0,3	25.593,9	1,47
2009	3.508,4	8.764,0	2.570,6	7.371,0	415,0	2.980,6	26,0	1,1	25.636,7	0,17

Sumber / Source: Statistik PLN 2008 - 2009/ PLN Statistic 2008 - 2009

Sedangkan jika dilihat dari prediksi perencanaan pengembangan kapasitas pembangkit untuk beberapa tahun kedepan:

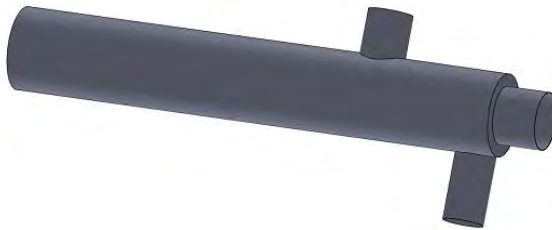
Tabel 1.2 Rencana peningkatan kapasitas masing-masing pembangkit sampai dengan tahun 2020

No.	FUEL TYPE	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1	HSD	29.846	17.346	8.658	4.331	2.549	2.465	2.316	2.261	2.428	2.635
2	MFO	10.037	4.807	2.385	556	44	56	51	65	85	65
3	Gas	32.017	42.691	46.158	46.002	43.441	43.118	35.657	25.992	28.331	30.879
4	LNG	-	7.578	6.113	10.970	14.817	15.068	20.874	29.394	30.088	31.541
5	Batubara	93.049	110.043	134.578	151.524	163.311	178.749	193.084	207.868	221.392	238.432
6	Hydro	11.149	11.204	12.363	12.791	13.841	16.292	17.704	19.349	20.429	21.429
7	Surya/ Hybrid	2	4	4	5	6	6	6	6	7	7
8	Biomass	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
9	Impor	-	-	-	709	721	733	737	738	314	317
10	Geother- mal	9.033	8.650	9.828	11.939	19.814	23.078	29.405	36.302	42.828	46.005
	TOTAL	185.197	202.387	220.150	238.891	258.606	279.628	299.897	322.038	348.964	371.374

BBM masih digunakan sebagai kebutuhan dalam menjalankan sebuah sistem pembangkit listrik tenaga uap, khususnya pada saat proses *start up*, proses *start up* adalah proses memanaskan furnace sampai temperatur operasi sehingga

batubara yang masuk dapat terbakar, pada proses *start up* tersebut membutuhkan bahan bakar solar dalam jumlah besar dan waktu yang lama sehingga biaya yang dikeluarkan untuk proses tersebut sangat besar, maka dibutuhkan suatu pengembangan desain pada sistem tersebut khususnya pada bagian *Start up Burner*

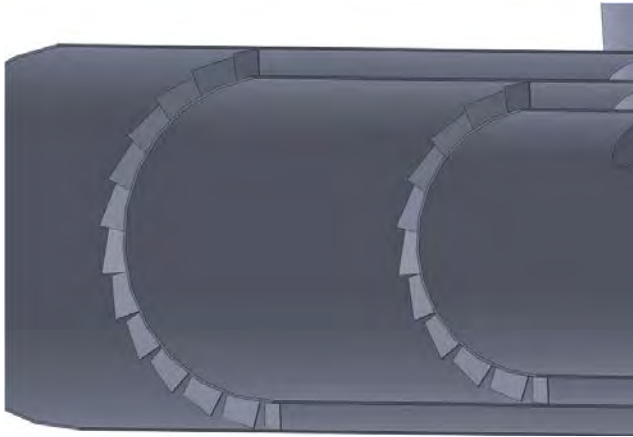
Pada tugas akhir ini direncanakan untuk memodelkan *start up burner* kombinasi yang dapat membakar batu bara langsung pada *start up burner*, model start up burner kombinasi ini diharapkan dapat mengurangi jumlah bahan bakar minyak yang digunakan untuk proses start up . Burner yang dirancang dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 1.1 gambar rancangan start up burner



Gambar 1.2 gambar rancangan start up burner potongan samping



Gambar 1.3. gambar fin swirl air pada burner

Start up burner ini bekerja dengan cara mengalirkan serbuk batubara dan udara melewati api dari burner berbahan bakar minyak BBM, kemudian diberi udara tambahan dari blower secondary berupa swirl air untuk menyempurnakan pembakaran.

Laju aliran massa *pulverized coal*, dan udara *carrier* pada burner tersebut sangat menentukan hasil pembakaran dan nyala api yang terjadi. Maka dari itu diperlukan penelitian mengenai pengaruh Laju aliran massa *pulverized coal*, dan udara *carrier* yang optimal agar pembakaran yang terjadi di dalam burner sempurna dan memiliki nyala api yang baik.

## 1.2. Perumusan Masalah

Pada penulisan Tugas akhir ini akan dilakukan penelitian dengan menggunakan simulasi numerik untuk melihat karakteristik pembakaran yang dilihat dari kontur temperatur nyala api, dan emisi yang dihasilkan oleh pembakaran yang terjadi pada burner yang dirancang, sebagai validasi keabsahan hasil simulasi yang dilakukan, start up burner rancangan ini akan dioperasikan dengan kecepatan swirl air tetap sebesar 17,39 m/s, laju alir massa bahan bakar pada oil burner 3kg/s dengan laju alir massa udara pada oil burner sebesar 50.8 kg/h, sedangkan untuk



udara carrier dan coal akan divariasikan, variasi dari laju aliran massa yang divariasikan untuk validasi antara lain.

Tabel 1.3 variasi mass flow rate untuk validasi simulasi

$\dot{m}$ carrier air (kg/s)	$\dot{m}$ udara total (kg/s)	$\dot{m}$ coal (kg/s)	AFR
0.1489	0.2106	<b>0.0835</b>	2.5
0.1292	0.1909	<b>0.0637</b>	2.9
0.1140	0.1757	<b>0.0497</b>	3.5

Sedangkan untuk menguji performa dari start up burner rancangan ini akan dilakukan pengoperasian dengan laju aliran carrier air tetap 19m/s dan laju aliran massa coal divariasikan sebagai berikut.

Tabel 1.4 variasi mass flow rate untuk percobaan simulasi

$\dot{m}$ carrier air (kg/s)	$\dot{m}$ Total air (kg/s)	$\dot{m}$ coal (kg/s)	AFR
0.1754	0.2371	0.079	3
0.1754	0.2371	0.0474	5
0.1754	0.2371	0.0338	7

pelaksanaan penelitian dilakukan dengan pemodelan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan *software ANSYS Fluent 15.0* dan akan di validasi dengan hasil eksperimen. Yang diteliti dari hasil simulasi adalah nyala api pembakaran yang ditinjau dari kontur temperatur,  $O_2$  yang tersisa,  $CO_2$  yang dihasilkan, dan hasil gas buang  $NO_x$  yang terbentuk pada burner, simulasi dilakukan untuk mengetahui berapakah laju aliran massa udara carrier dan coal yang terbaik dari variasi yang dilakukan agar mendapatkan panjang nyala api dan distribusi temperatur yang optimal serta hasil emisi yang terbaik.

### 1.3. Batasan Masalah

Untuk menganalisa permasalahan di atas, terdapat beberapa batasan masalah yang diambil dalam penelitian ini, diantaranya :

1. Simulasi pembakaran secara three dimensional (3D) dilakukan pada sebuah model start up burner yang telah ditentukan geometri nya.
2. Kecepatan swirl air tetap sebesar 17.39 m/s
3. Laju aliran massa bahan bakar pada oil burner tetap sebesar 3kg/h dan laju aliran udara pada oil burner sebesar 50.8 kg/h
4. Data bahan pulverized coal diperoleh dari PT. PJB UP Paiton.
5. Software yang digunakan pada tahapan pembuatan geometri adalah software Gambit 2.4.6, sedangkan untuk tahapan simulasi menggunakan software ANSYS FLUENT 15.

### 1.4. Tujuan penulisan

Tujuan dilakukannya penelitian pembakaran pulverized coal di dalam burner yang telah dimodifikasi dengan menggunakan simulasi ini, diantaranya sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh swirl air terhadap aliran pulverized coal di dalam burner
2. Mengetahui fenomena pembakaran yang terjadi di mulut burner berdasarkan visualisasi distribusi temperatur dan emisi gas buang
3. Mengetahui laju aliran massa udara carrier dan coal untuk mendapatkan hasil pembakaran yang paling baik
4. Menghemat biaya penelitian

### **1.5. Manfaat penulisan**

Manfaat dari hasil penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik pembakaran dari campuran pulverized coal dan udara yang terjadi sehingga hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi. Selain itu, dari hasil penelitian ini juga dapat memberikan pengetahuan dan pengalaman mengenai konsep studi CFD *Computational Fluid dynamics* untuk simulasi pembakaran campuran pulverized coal, dan udara di dalam suatu burner, menggunakan software SOLIDWORKS 2013 untuk menggambarkan geometri dari burner, GAMBIT 2.4.6. untuk melakukan proses meshing dan ANSYS FLUENT untuk proses simulasi pembakaran yang terjadi.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

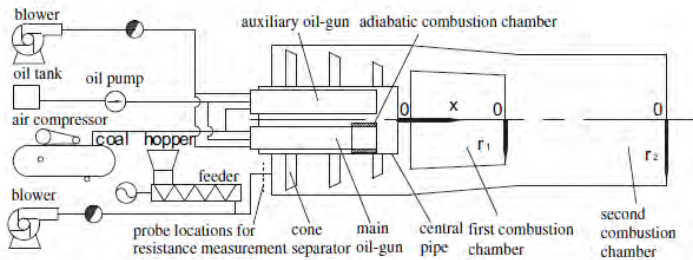
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

- *Bituminous coal combustion in a full-scale start-up ignition burner: Influence of the excess air ratio*

**Zengqi Li, 2009 dkk** melakukan penelitian pada tiny burner mengenai pengaruh excess air dengan variasi ratio 0.56, 0.75, 0.98 dan 1.14 dan kecepatan dari variasi excess air pada primary air 17, 23, 30 dan 35 m/s terhadap distribusi temperatur dari flue gas. Model dari burner yang digunakan seperti gambar dibawah:

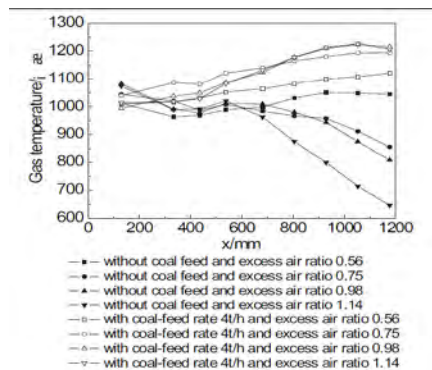


Gambar 2.1 Skema peralatan pada pengujian tiny burner

Hasil dari percobaan secara eksperimen memiliki kesimpulan yang sama dengan hasil dari percobaan secara simulasi numerik yang mana pengaturan dan kalkulasi secara iterasi telah dibuat mendekati dengan kondisi nyata pada percobaan secara eksperimen.

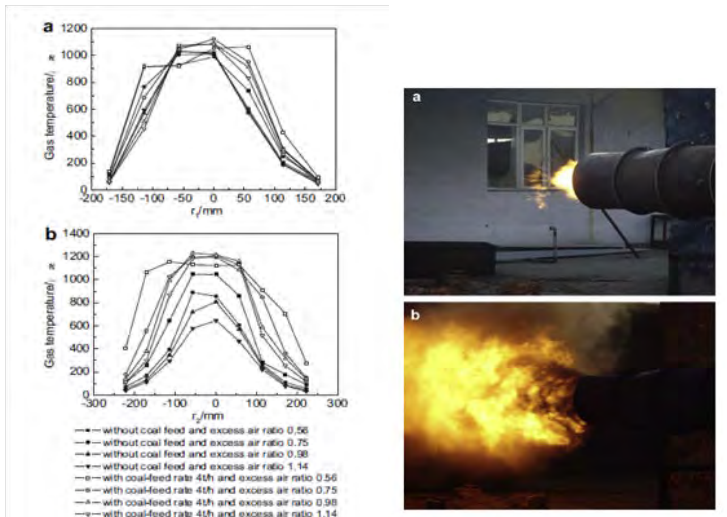
Pada percobaan ini burner memiliki 2 oil gun, maka percobaan dilakukan perbandingan yaitu percobaan dengan menggunakan coal feed rate 4t/h dan percobaan tanpa coal. Kesimpulan dari percobaan secara eksperimen ini adalah terjadinya temperatur tertinggi sepanjang center line dari burner dan menyebar secara radial ke dinding burner untuk semua ratio

excess air. Selain itu juga makin besar ratio excess air, temperatur flue gas pada outlet burner menurun, karena semakin besar ratio excess air maka kecepatannya juga bertambah sehingga panas yang diserap oleh cold air juga semakin besar. Excess air ratio dari 0.56 sampai 1.14 dan temperature gas dari 1045 °C menjadi 646 °C. Sedangkan CO yang dihasilkan sejumlah 1000ppm  $O_2$  dan konsentrasi  $O_2$  pada outlet yaitu 0.01 - 3.70%.



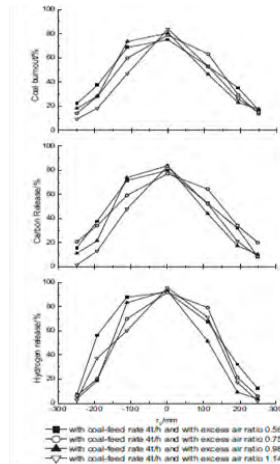
Gambar 2.2 grafik pembakaran burner dengan menggunakan coal dan tanpa menggunakan coal

Selain itu pada pembakaran tanpa coal terjadi perbedaan temperatur pada outlet pada stage 1 dan stage 2. Yaitu temperatur outlet stage 1 > temperatur pada outlet stage 2, hal tersebut terjadi karena pembakaran dari 2 oil gun tersebut terjadi di tengah pipa yaitu pada saluran outlet stage 1, dan setelah itu flue gas bercampur dengan cold air sehingga temperatur pada outlet stage 2 turun. Sedangkan wall temperatur stage 1 < wall temperatur stage 2, karena pembakaran terjadi pada outlet 1 stage 1 sehingga lebih mendekati pada wall stage 2.



Gambar 2.3 Hasil pembakaran dan grafik temperatur pada outlet burner dari pembakaran dengan coal dan tanpa coal

Sedangkan jika pada pembakaran burner dengan coal temperatur outlet stage 1 < outlet stage 2 hal tersebut karena pulverized coal lebih banyak terbakar pada saat mendekati outlet stage 2. Dan jika kecepatan pada primary air meningkat maka waktu pencampuran coal dengan air semakin sedikit sehingga pembakaran kurang sempurna dan masih ada sedikit pulverized coal yang ikut keluar burner.

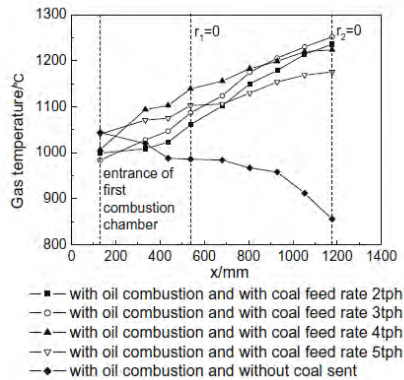


Gambar 2.4 grafik Unburn Coal, Carbon dan Hydrogen hasil dari pembakaran burner dengan feed rate 4t/h.

- *Influence of coal-feed rates on bituminous coal ignition in a full-scale tiny-oil ignition burner*

**Chunlong Liu dkk** melakukan percobaan kembali tentang Tiny Oil Burner dengan mengembangkan variasi Coal feed Rate 2,3,4 dan 5 ton/jam untuk mengetahui jumlah pemasukan pulverize coal yang optimal dan juga distribusi temperatur gas pada outlet burner. Pengaturan peralatan dan kebutuhan fuel oil yang digunakan sama dengan pengaturan sebelumnya yaitu dengan menggunakan 2 oil gun main gun dan auxiliary gun serta ratio dari primary air yang diatur dari blower. Dari percobaan yang telah dilakukan chunlong dkk didapatkan hasil dari pembakaran Fuel Oil pada burner tanpa menggunakan coal dan menggunakan coal.

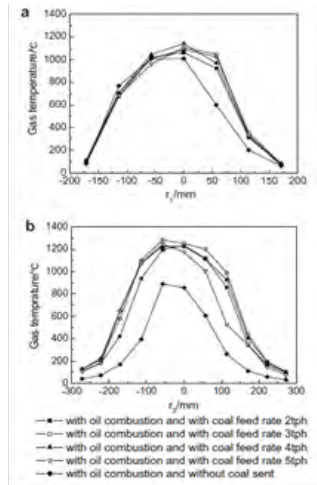




Gambar 2.5 grafik temperatur gas terhadap radius burner dengan variasi coal dan tanpa coal

Dari percobaan tersebut terlihat temperatur pada pembakaran tanpa coal di outlet stage 1 > dari temperatur di outlet stage 2, karena Fuel oil yang diinjeksikan dari kedua oil gun baru terbakar pada saat mencapai outlet stage 1 dan setelah itu bercampur dengan cold air sehingga temperatur di outlet stage 2 menurun dari 1044 °C menjadi 856 °C. Sedangkan pembakaran yang menggunakan coal feed rate untuk semua variasi temperaturnya terus meningkat dari outlet stage 1 sampai outlet stage 2, karena terjadinya penambahan energi dari pembakaran batubara, sehingga Temperatur wall pada stage 1 sebesar 116 °C dan pada wall stage 2 sebesar 127 °C.

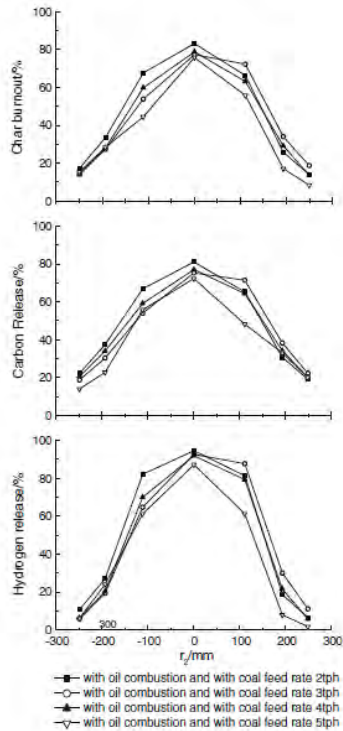
Sedangkan temperatur gas maksimum yang terjadi pada burner secara radial pada outlet stage 1 dan stage 2 dari variasi coal feed rate seperti ambar dibawah:



Gambar 2.6 grafik gas temperatur terhadap radius dari burner pada outlet stage 1 dan stage 2 dengan variasi coal feed rate dan tanpa coal.

Dari grafik a terlihat bahwa pada outlet stage 1 temperatur paling tinggi pada feed rate 4t/h, namun di grafik b pada outlet stage 2 temperatur paling tinggi pada feed rate 3t/h, hal tersebut disebabkan karena jumlah coal yang di berikan untuk feed rate diatas 3t/h terlalu besar dengan kecepatan yang konstan 23m/s, sehingga masih banyak batubara yang belum terbakar karena kekurangan oksigen, selain itu juga waktu yang dibutuhkan untuk pelepasan kalor terlalu singkat sehingga banyak unburnt coal yang keluar dari burner.

Sedangkan untuk kandungan carbon dan hydrogen dan unburnt coal dari hasil dari pembakaran dengan variasi coal feed rate secara radial pada outlet burner adalah seperti gambar dibawah:



Gambar 2.7 kandungan carbon dan hydrogen dan unburnt coal dari hasil dari pembakaran dengan variasi coal feed rate secara radial pada outlet burner

Dari grafik di atas dapat disimpulkan bahwa Char Burntout, C dan H yang di lepaskan pada outlet stage 2 untuk semua variasi feed rate hampir sama, dan pada center burner tingkat Char Burntout, C dan H yang di lepaskan menurun sesuai dengan bertambahnya coal feed rate 2-5 t/h dari 81%, 95%, 83% menjadi 72%, 87%, 75%. Sedangkan untuk kadar  $O_2$  pada center burner dengan variasi feed rate 2-3-4 dan 5 adalah 0,04-0,02-0,01 dan 0,01 dan untuk CO semuanya melebihi 10000ppm. Sedangkan untuk penggunaan

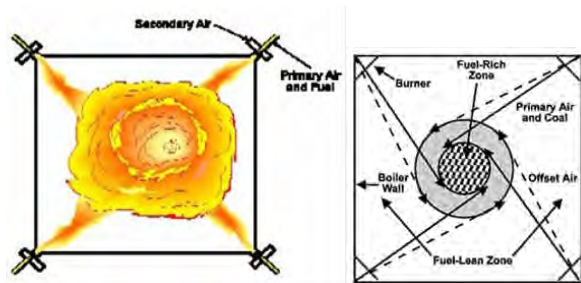
total Fuel Oil yang awalnya tanpa tiny oil burner adalah 1000kg/h menjadi 100kg/h sehingga dapat berhemat 90%.

## **2.2. Dasar Teori**

### **2.2.1 Boiler**

*Boiler* merupakan suatu peralatan yang berfungsi menguapkan suatu fluida kerja di dalamnya. Fluida kerja yang pada umumnya digunakan adalah air. Secara khusus, *boiler* mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi kalor di dalam *steam*, atau energi kalor dari gas panas menjadi energi kalor dari *steam* tanpa melibatkan proses pembakaran. Pada *boiler*, terdapat dua proses utama yang bekerja, yakni pembakaran dan perpindahan panas. Pembakaran bertujuan melepaskan energi panas dari bahan bakar menggunakan *firing equipment*. Sedangkan perpindahan panas terjadi antara *flue gas* hasil pembakaran bahan bakar dengan air maupun uap air di dalam komponen *heat traps* dari *boiler*.

Pada PLTU unit 1 dan 2 PT. PJB UP Paiton, jenis *boiler* yang digunakan berdasarkan pipanya adalah *watertube boiler*, dimana fluida kerja dalam fase cair atau uap, dialirkan melalui sisi dalam *tube*, sedangkan *flue gas* dari pembakaran mengalir pada sisi luar *tube*, dan jika berdasarkan bahan bakar yang digunakan adalah boiler bahan bakar padat tipe *pulverized coal boiler*. Untuk metode pembakaran dari *boiler* tersebut adalah *tangensial wall firing*, dimana proses pembakaran dilakukan dengan menggunakan empat buah burner dari keempat sudut untuk menciptakan bola api pada pusat tungku. Gambar 2.1 merupakan skema dari sistem *boiler* PLTU unit 1 dan 2, PT. PJB UP Paiton.



Gambar 2.8 Ilustrasi proses pembakaran pada tangentially-fired boiler

Terdapat beberapa komponen utama yang menunjang proses pembakaran maupun perpindahan panas di dalam *boiler* PLTU unit 1, PT. PJB UP Patiton, diantaranya:

1. *Boiler furnace* merupakan ruang terjadinya pembakaran bahan bakar. Di dalam *furnace* terdapat *firing equipment* yang berfungsi menginjeksikan serta membakar campuran bahan bakar dan udara yang dimasukkan ke dalam *furnace*.
2. *Burner* merupakan salah satu *firing equipment* yang berfungsi untuk yang berperan dalam memasukkan bahan bakar dan udara kedalam *furnace*, dan didalam *burner* juga terdapat *ignitor* yang berfungsi sebagai pemicu pembakaran dari bahan bakar dan udara yang kemudian pembakaran dan *flue gas* berlanjut ke dalam *furnace*.
3. *Waterwall*, merupakan komponen yang berperan dalam proses penguapan air dan terletak pada dinding *boiler furnace*.
4. *Primary Air Fan* (PA Fan) berfungsi sebagai pemasok *Primary Air* (udara primer). Udara primer yang dihembuskan menuju ke alat penggiling batubara (*Pulverizer*) kemudian bersama-sama dengan serbuk batubara dialirkan ke *Furnace*.

5. *Force Draft Fan (FD Fan)* dan *Induced Draft Fan (ID Fan)* berfungsi sebagai pemasok *Secondary Air*(udara sekunder)
6. *Steam Drum* Berfungsi untuk menyimpan air dalam volume yang besar dan untuk memisahkan uap dari air setelah proses pemanasan yang terjadi dalam boiler.

### 2.2.2 Prinsip Pembakaran

Proses pembakaran merupakan laju oksidasi dari suatu bahan bakar yang tersusun dari komponen *hydrocarbons* dalam menghasilkan energi panas. Pembakaran sempurna dari suatu bahan bakar dapat dicapai dengan adanya campuran yang tepat antara jumlah bahan bakar dan oksigen. Bahan bakar padat maupun cair, harus berubah dalam fase gas sebelum terbakar, sedangkan bahan bakar gas akan terbakar dengan sendirinya apabila terdapat persentase campuran udara yang tepat. Biasanya, diperlukan adanya pemanasan dalam mengubah bahan bakar padat maupun cair menjadi fase gas. Kriteria pembakaran yang baik dan sempurna adalah proses pembakaran yang dapat melepas keseluruhan energi panas yang terkandung dalam bahan bakar. Untuk memperoleh keseluruhan energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran, nyala api pembakaran yang dihasilkan harus pada kondisi stabil, tidak padam, dan juga tidak terjadi nyala api balik ke arah *burner*, selain itu juga harus di perhatikan bahwa dalam pembakaran terdapat laju perambatan api, sehingga aliran atau laju dari bahan bakar atau campuran bahan bakar dan udara tidak boleh lebih besar dari pada laju pembakarannya, karena akan dapat menyebabkan kegagalan pembakaran atau bahan bakar tidak terbakar.

Syarat terjadinya pembakaran diperlukan adanya tiga parameter utama, diantaranya :

1. Adanya pemicu atau pemantik, untuk memicu dan menjaga kontinuitas proses pembakaran. Namun ada juga yang tidak menggunakan pemantik tetapi memanfaatkan tekanan atau

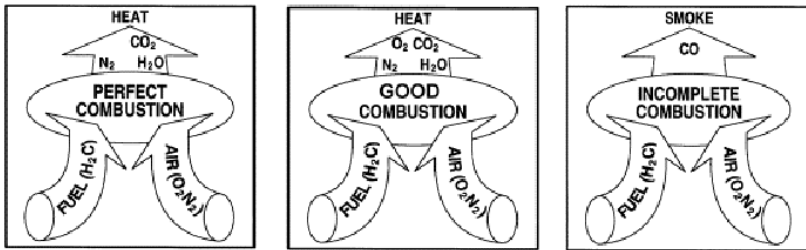
temperatur tinggi melebihi temperatur bakar dari bahan bakarnya, sehingga dengan masuknya bahan bakar dan udara pembakaran akan secara langsung terjadi dengan sendirinya dan berkelanjutan.

2. Bahan bakar, dalam hal ini bahan bakarnya adalah batubara dan solar.
3. Udara (oksigen).

Sedangkan untuk memperoleh pembakaran batu bara yang sempurna diperlukan beberapa parameter diantaranya:

1. Temperatur tinggi, untuk memicu dan menjaga kontinuitas proses pembakaran.
2. Turbulensi aliran, untuk memaksimalkan pencampuran bahan bakar dan udara menjadi homogen.
3. Temperatur udara yang masuk, jika temperatur udara yang masuk lebih tinggi maka pembakaran akan mudah terjadi.
4. Kondisi Bahan bakar, jika batubara yang di bakar kadar airnya terlalu besar maka pembakaran akan lebih sulit terjadi.
5. Durasi atau rentang waktu, untuk membakar bahan bakar secara keseluruhan.

Pembakaran dengan bahan bakar berlebih maupun kekurangan, dapat memperbesar potensi adanya bahan bakar yang tidak terbakar maupun pembentukan CO. Berdasarkan hal tersebut, diperlukan adanya komposisi O<sub>2</sub> yang tepat dengan adanya *excess air* untuk memastikan terjadinya pembakaran sempurna. Namun, dengan terlalu banyak komposisi *excess air*, juga dapat meningkatkan kerugian panas maupun efisiensi dari pembakaran. Hal tersebut dikarenakan energi panas yang dilepaskan dari proses pembakaran semakin banyak diserap oleh komponen N<sub>2</sub> di dalam udara yang tidak dapat terbakar. Pada dasarnya udara tersusun dari komponen N<sub>2</sub> sekitar 78%, O<sub>2</sub> sekitar 21%, dan 1% sisanya adalah *argon* dan gas-gas yang lain.

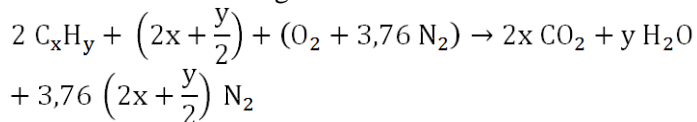


Gambar 2.9. Kriteria hasil pembakaran sempurna, baik, dan tak sempurna (*Bureau of Energy Efficiency*, 2004)

### 2.2.3 Perhitungan Stoikiometri

#### a. Fuel Oil

Pada umumnya, pembakaran sempurna atau *stoichiometry* hanya menghasilkan komponen CO<sub>2</sub>, uap air (H<sub>2</sub>O), dan energi panas. Berikut di bawah ini merupakan simplifikasi persamaan untuk reaksi pembakaran *stoichiometry* antara suatu bahan bakar *hydrocarbon* atau *Fuel Oil* dengan udara secara umum :



#### b. Pulverized Coal

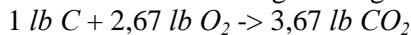
Definisi yang lain tentang proses pembakaran adalah reaksi yang sangat cepat antara bahan bakar dengan oksider untuk menghasilkan produk. Dalam hal ini oksider adalah udara. Udara terdiri atas 21 % oksigen dan 79 % nitrogen (basis mola). Pembakaran terjadi sempurna apabila :

1. Semua Carbon C yang terdapat di dalam bahan bakar menjadi CO<sub>2</sub> di dalam produk
2. Semua Hidrogen H yang terdapat dalam bahan bakar menjadi H<sub>2</sub>O didalam produk dan
3. Semua Sulfur S di dalam bahan bakar menjadi SO<sub>2</sub> di dalam produk.

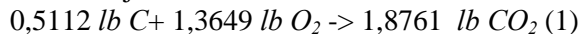


Dari gambaran ini terlihat bahwa unsur Carbon, Hidrogen dan Sulfur yang terkandung dalam bahan bakar misalnya batubara sangat menentukan kebutuhan udara pembakaran. dibawah ini merupakan contoh reaksi pada ketiga unsur tersebut untuk mendapatkan jumlah udara yang dibutuhkan berdasarkan metode *gravimetri*. Data batubara dari PT.PJB Paiton yang paling bagus dari 3 *suplier* adalah batu bara A, mengandung 51,12 % C, 0,98 % N<sub>2</sub>, 13,78 % O<sub>2</sub>, 3,12% H<sub>2</sub>, 0,31 % S .

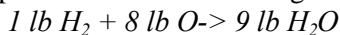
- Reaksi pembakaran carbon dengan oksigen adalah :



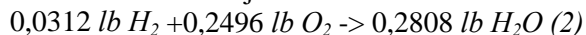
Karena batubara mengandung 51,12% C maka persamaan reaksi di atas menjadi:



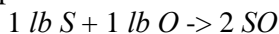
- Reaksi pembakaran antara hidrogen dengan oksigen adalah :



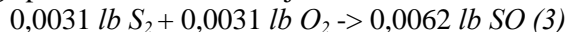
Kandungan hidrogen dalam batubara antracite adalah 3,12%, maka persamaan reaksi menjadi :



- Reaksi pembakaran antara sulfur dengan oksigen adalah :



Kandungan sulfur dalam batubara antracite adalah 0,7 %, sehingga persamaan reaksi menjadi :



Jumlah oksigen pada persamaan (1),(2) dan (3) = 1,3649 + 0,2496 + 0,0062 = 1,6519 O<sub>2</sub>. Oleh karena batubara mengandung 0,1378 O<sub>2</sub>, maka oksigen yang diperlukan dari udara adalah = 1,6519 lb O<sub>2</sub> – 0,1378 lb O<sub>2</sub> dari batubara = 1,5141 lb O<sub>2</sub>. Berat udara teoritis = 1,5141 ( 1 lb O<sub>2</sub> + 3,76 lb N<sub>2</sub> = 4,76 lb udara) = 1,5141 lb O<sub>2</sub> + 5,693 lb N<sub>2</sub> = 7,2071 lb udara

Kelebihan udara untuk membakar bahan bakar batubara antracite adalah 5 % , maka kebutuhan udara untuk pembakaran batubara antracite adalah = 1,05 x 7,2071 lb udara/ lb batubara = 7,5675 lb udara/lb batubara

### 2.2.4 Laju Massa Batubara (*coal feed rate*)

Pada simulasi yang dilakukan ini, jumlah atubara yang dimasukkan kedalam burner tergantung dari pada besarnya perdaan tekanan pada venturi yang digunakan, sehingga diperlukan simulasi aliran udara yang terjadi dalam venturi sehingga dengan adanya perbedaan tekanan tersebut dapat diketahui kecepatan yang di terima oleh batu bara dengan menggunakan persamaan *bernouli*.

Untuk menghitung *mass flowrate* batubara dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$\dot{m} = \rho \times v \times A \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana :

$\dot{m}$  = Laju massa batubara (Kg/s)

$V$  = Kecepatan Batubara (m/s)

$\rho$  = Massa Jenis batubara (Kg/m<sup>3</sup>)

$A$  = Luas penampang Inlet batubara (m<sup>2</sup>)

### 2.2.5 Sistem Pembakaran

Sistem pembakaran bahan bakar yang digunakan bergantung pada jenis penggunaannya. Terdapat dua jenis sistem pembakaran, yakni :

#### 1. Diffusion system

Pada sistem pembakaran diffusion, pencampuran bahan bakar dan udara terjadi pada sisi dalam dari burner, atau bahan bakar dan udara mengalir pada laluan yang berbeda menuju combustion chamber. Parameter yang mengindikasikan intensitas pencampuran adalah swirl number. Swirl number merupakan rasio antara momen radial dan momen aksial dari total aliran di dalam burner.

#### 2. Premix system

Pada sistem pembakaran premix, kebutuhan udara yang diperlukan untuk pembakaran dicampur secara keseluruhan

dengan bahan bakar sebelum terjadinya proses pembakaran di dalam combustion chamber. Hal tersebut akan menghasilkan pencampuran bahan bakar dan udara sebelum memasuki burner untuk meningkatkan laju pembakaran dan volum beban termal.

### 2.2.6 Batubara

*Batubara* merupakan bahan bakar dalam fase padat yang berasal dari endapan fosil dan tumbuhan dalam tanah dan mengandung beberapa unsur utama seperti karbon, hidrogen dan oksigen. Semakin lama umur endapan dari batu bara, nilai kalor atau kualitasnya juga semakin bagus. Selain itu, meskipun batubara memiliki nilai kalor per unit massa yang tidak lebih besar dibandingkan dengan jenis bahan bakar lainnya, namun persediaannya bisa dibilang masih cukup banyak sehingga para investor dan perusahaan-perusahaan lokal makin banyak membangun pembangkit berbahan bakar batu bara. Klasifikasi batubara berdasarkan nilai kalorinya dapat ditabelkan sebagai berikut.

Tabel 2.10 Klasifikasi batubara (*American Standard for testing and materials*)

<b><i>Class</i></b>	<b><i>Group</i></b>	<b><i>Calorific Value Limits (MJ kg<sup>-1</sup>)</i></b>
<i>Anthracite</i>	<i>Meta-anthracite</i>	-----
	<i>Anthracite</i>	32.5 – 34.0
	<i>Semianthracite</i>	26.7 – 32.5
<i>Bituminous</i>	<i>Low volatile bituminous</i>	-----
	<i>Medium volatile bituminous</i>	-----
	<i>High volatile A Bituminous</i>	≥ 32.6
	<i>High volatile B</i>	30.2 – 32.6

	<i>Bituminous</i>	
	<i>High volatile C Bituminous</i>	24.4 – 30.2
<i>Subbituminous</i>	<i>Subbituminous A</i>	24.4 – 26.7
	<i>Subbituminous B</i>	22.1 – 24.4
	<i>Subbituminous C</i>	19.3 – 22.1
<i>Lignite</i>	<i>Lignite A</i>	14.7 – 19.3
	<i>Lignite B</i>	$\leq 14.7$

Sesuai dengan klasifikasi yang dibuat oleh ECE-United Nations dan berdasarkan data batubara yang digunakan PT. PJB Paiton, maka batubara tersebut termasuk batubara *semianthracite* atau *High volatile C Bituminous*. Semakin tinggi nilai kalor yang terkandung dalam suatu batubara, maka kandungan *fixed carbon* semakin banyak dan kandungan *moisture* semakin sedikit.

### 2.2.7 Deskripsi tentang RANS Turbulensi Model

- **Spalart–Allmaras:** Merupakan model turbulensi dengan satu persamaan yang menyelesaikan model persamaan *transport* untuk viskositas turbulen. Model ini didesain secara khusus untuk aplikasi *aerospace* yang melibatkan *wall-bounded flows* dan telah menunjukkan hasil yang baik untuk lapisan batas yang dipengaruhi *adverse pressure gradient*. Bentuk dasar model spalart – allmaras hanya efektif pada model dengan bilangan *Reynolds* yang kecil. Model ini dapat digunakan untuk simulasi yang relatif kasar dengan ukuran *mesh* yang besar, dimana perhitungan aliran turbulen yang akurat bukan merupakan hal yang kritis.
- **Standard  $k-\epsilon$ :** Pemodelan yang menggunakan persamaan transport untuk penyelesaian model  $k - \epsilon$ . Model ini juga dapat menyelesaikan untuk *heating*, *buoyancy* dan *compressibility* yang dapat diselesaikan dalam  $k-\epsilon$  model yang lainnya. Model tidak cocok untuk aliran kompleks yang meliputi *strong stream curvature* dan *separation*.

- **RNG  $k-\epsilon$ :** Variasi pemodelan dari *standard  $k-\epsilon$  model*. Model ini sangat signifikan untuk mengubah dalam persamaan  $\epsilon$ , sehingga dapat memperbaiki model yang mempunyai *highly strained flows*. Dalam model ini juga dapat digunakan untuk aliran yang mempunyai  $Re$  yang rendah dan untuk memprediksi aliran yang mempunyai efek *swirling*.
- **Realizable  $k-\epsilon$ :** Variasi pemodelan dari *standard  $k-\epsilon$  model*. Dengan menggunakan model ini dapat dilakukan untuk menentang penggunaan *mathematical constraints* sehingga dengan pemodelan ini cukup dapat memperbaiki performansi dari model tanpa menggunakan *mathematical constraints*.
- **Standard  $k-\omega$ :** Pemodelan yang menggunakan dua persamaan transport model untuk memecahkan  $k-\omega$ . Pemodelan ini juga dapat digunakan untuk aliran yang memiliki  $Re$  yang rendah. Pemodelan ini juga dapat menampilkan transisi aliran dari aliran laminar menuju aliran turbulen. Keuntungan lainnya adalah dapat menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.
- **SST  $k-\omega$ :** Variasi dari pemodelan *standard  $k-\omega$* . Mengkombinasikan pemodelan asli *Wilcox model* (1988) untuk menggunakan *near wall treatment* dan *standard  $k-\epsilon$  model*.
- **RSM:** Merupakan model turbulensi yang paling teliti pada *fluent*. Model RSM mendekati persamaan *Navier-Stokes (Reynolds-averaged)* dengan menyelesaikan persamaan transport untuk tegangan *reynolds* bersama-sama dengan persamaan laju dissipasi. Model ini menggunakan 5 persamaan transport, lebih banyak dibanding model turbulensi yang lain. Model RSM menghitung efek dari kurva *streamline*, pusaran (*swirl*), putaran, dan perubahan tiba-tiba pada aliran dengan lebih teliti daripada model turbulensi yang lain, sehingga dapat memberikan prediksi yang lebih akurat untuk aliran yang lebih kompleks.

### 2.2.8 Model Species

- **Species Transport:** Memodelkan pencampuran dan transportasi dari spesies kimia dengan menyelesaikan persamaan konservasi yang menggambarkan konveksi, difusi, dan reaksi kimia untuk masing-masing spesies kimia yang diinjeksikan. Reaksi kimia yang dapat dimodelkan yaitu reaksi yang terjadi pada fase massal (reaksi volumetrik), reaksi pada dinding atau pada particle, dan reaksi pada *porous region*.
- **Non Premixed Combustion:** Memodelkan pembakaran dengan bahan bakar dan oksidator melewati aliran yang berbeda sebelum memasuki zona pembakaran. Contoh *non-premixed combustion* adalah *pulverized coal furnace* dan *diesel internal-combustion engines*.
- **Premixed Combustion:** Memodelkan pembakaran dengan bahan bakar dan oksidator dicampurkan terlebih dahulu sebelum memasuki zona pembakaran. Contoh *premixed combustion* adalah *otto engines*.
- **Partially Premixed Combustion:** Merupakan pemodelan pembakaran yang pencampuran antara bahan bakar dan oksidatornya tidak uniform, sehingga pencampuran yang terjadi tidak sempurna. Pembakaran ini adalah gabungan pemodelan antara *non-premixed* dan *premixed combustion*.
- **Composition PDF Transport:** Digunakan untuk memodelkan efek *finite rate chemistry* pada aliran yang turbulen.

### 2.2.9 Model Discrete Phase

Pada FLUENT, pemodelan *discrete phase* meliputi :

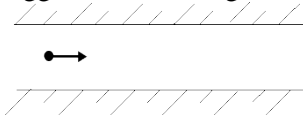
- Perhitungan *discrete phase trajectory* menggunakan rumus Lagrangian yang mencakup *discrete phase inertia*, hydrodynamic drag, dan gaya gravitasi, baik untuk aliran steady dan unsteady.
- Memprediksi efek turbulensi pada penyebaran partikel sebagai akibat dari pusaran turbulen pada *continues phase*.

- Pemanasan/pendinginan dari fase diskrit
- Penguapan atau pendidihan liquid droplet
- Combusting particle, meliputi reaksi volatil dan pembakaran char untuk mensimulasikan pembakaran batubara
- Peleburan dan pemisahan droplet

Pada pemodelan *discrete phase* akan diuraikan mengenai pemodelan injeksi. Pemodelan pada penginjeksian terdiri dari :

- Injection Type**, mendefinisikan tipe penginjeksian yang memiliki initial condition tertentu. Initial condition terdiri dari posisi partikel (koordinat x, y, dan z), kecepatan partikel (u, v, dan w), diameter partikel, temperatur partikel, dan mass flow rate aliran partikel. Macam-macam tipe injeksi adalah :

- **Single**, jika partikel yang diinjeksikan memiliki nilai tunggal untuk masing masing initial condition.



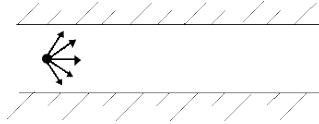
Gambar 2.11 Tipe injeksi 'single'

- **Group**, jika partikel memiliki range untuk satu atau lebih pada initial condition, misal range untuk diameter partikel atau posisi awal partikel.



Gambar 2.12 Tipe injeksi 'group'

- Cone (hanya pada 3D), jika partikel menyebar dalam bentuk kerucut.



Gambar 2.13 Tipe injeksi 'cone'

- Solid-cone (hanya pada 3D), jika partikel menyebar dalam bentuk kerucut untuk partikel solid
  - Surface, jika partikel yang diinjeksikan berasal dari sebuah zone surface atau surface yang didefinisikan sesuai dengan permukaan yang akan melepaskan partikel. Pada pemodelan maka pelepasan partikel pada sebuah surface berasal dari facet surface tersebut.
  - Plain-orifice atomizer, digunakan untuk internal nozzle flow.
  - Pressure-swirl atomizer, merupakan jenis atomizer yang digunakan untuk mempercepat aliran melalui nozzle (swirl port) ke dalam ruang pusaran pusat.
  - Air-blast-atomizer, merupakan variasi dari model pressure-swirl yang langsung mengatur ketebalan sheet yang digunakan.
  - Flat-fan-atomizer, hampir menyerupai model pressure-swirl namun sheet yang dihasilkan membentuk lembaran tipis dan tidak menggunakan swirl.
  - Effervescent-atomizer, penginjeksian liquid infused dengan superheated liquid yang dapat dengan cepat merubah fasa setelah keluar dari nozzle.
- b. Particle Type**, mendefinisikan bentuk maupun penyebaran partikel yang diinjeksikan. Macam-macam tipe partikel adalah sebagai berikut :
- Massless, adalah partikel tak bermassa yang mengikuti aliran dan temperatur dari fase kontinyu. Karena tidak memiliki



massa, maka partikel ini tidak memiliki sifat fisik yang terkait dan juga tidak dapat diberikan gaya kepada partikel tersebut.

Inert, merupakan elemen diskrit seperti partikel, droplet, maupun gelembung yang mematuhi hukum kesetimbangan gaya.

- Droplet, adalah jenis droplet cair yang mengalir pada aliran kontinyu fase gas, droplet ini mematuhi kesetimbangan gaya. Tipe partikel droplet akan tersedia jika pemodelan heat transfer diaktifkan dan setidaknya terdapat dua species kimia diaktifkan, atau jika non-premixed combustion / partially premixed combustion diaktifkan.
- Combusting, adalah partikel padat yang mematuhi persamaan kesetimbangan gaya, dipengaruhi oleh proses pemanasan maupun pendinginan, melewati proses devolatilization dan reaksi heterogen pada permukaan partikel, serta melalui proses pembakaran pada bagian non-volatile. Tipe partikel combusting akan tersedia jika pemodelan heat transfer diaktifkan dan setidaknya terdapat tiga species kimia diaktifkan, atau jika non-premixed combustion diaktifkan.
- Multicomponent, merupakan campuran partikel droplet. Partikel-partikel ini memiliki lebih dari satu komponen yang harus bereaksi pada satu proses.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB III METODOLOGI**

### **3.1 Tahapan Penelitian**

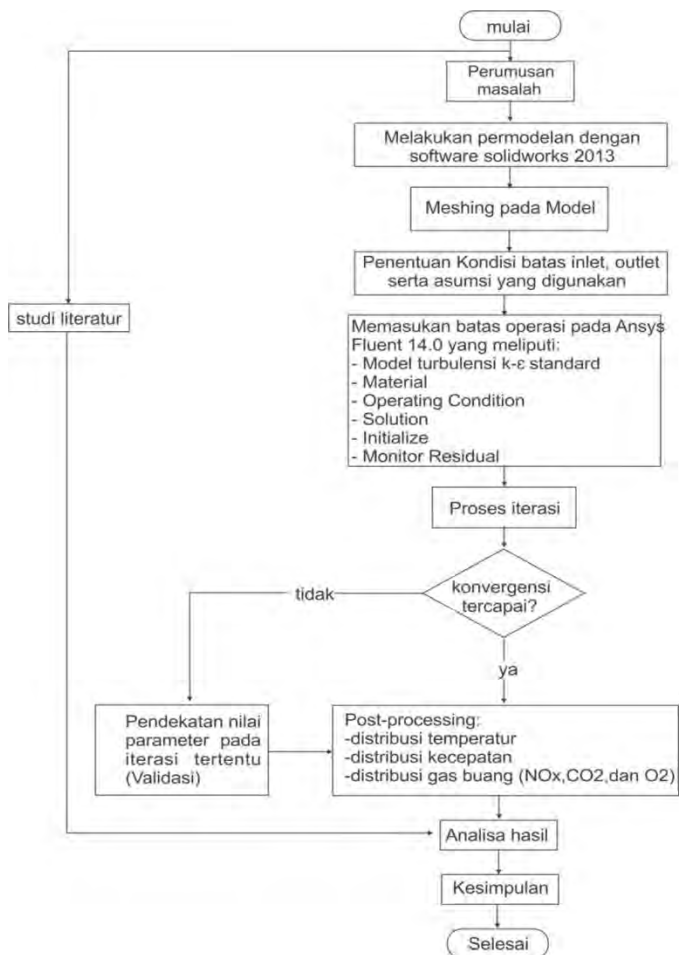
dalam melakukan penelitian dan simulasi CFD mengenai burner modifikasi, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan, antara lain :

- 1 Studi Kasus Permasalahan mengenai besarnya biaya yang dikeluarkan untuk proses start up pada burner karena sepenuhnya menggunakan bahan bakar solar, sehingga harus dilakukan perubahan pada desain dan sistem burner.
- 2 Studi Literatur Untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dibahas, dilakukan studi literatur yang berkaitan dengan proses operasional maupun pembakaran di burner serta studi literatur mengenai simulasi pembakaran bahan bakar liquid (diesel fuel) dan solid (pulverized coal) di dalam suatu burner. Studi literatur diperoleh dari e-book, jurnal, dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik permasalahan.
- 3 Pengumpulan dan Pengolahan data aktual sebelum melakukan penelitian, diperlukan adanya data acuan sebagai validasi pemodelan dan simulasi dari sistem yang akan ditinjau, sehingga dilakukan pengumpulan data aktual sebagai acuan validasi.
- 4 Pemodelan dan Simulasi Tahapan ini diawali dengan pre-processing membuat geometri dan penentuan domain dari sistem pembakaran di burner dengan desain yang telah ditentukan menggunakan software *Gambit 2.4.6*. Selanjutnya, dilakukan processing berupa proses simulasi dari domain sistem yang telah dibuat. Dan pada akhir simulasi, dilakukan post-processing dengan menampilkan hasil simulasi berupa distribusi temperature, serta distribusi gas buang. Untuk processing dan post- processing digunakan software ANSYS FLUENT 15.

- 5 Pengolahan dan Analisa Data Hasil Simulasi Setelah proses simulasi selesai, dilakukan pengambilan data hasil simulasi. Data tersebut ditampilkan dalam bentuk kontur untuk dianalisa secara kualitatif, dan juga diolah dalam bentuk grafik atau tabel sehingga dapat dianalisa secara kuantitatif. Dari kedua parameter tersebut, dapat dibahas fenomena dan karakteristik hasil pembakaran natural gas yang terjadi.
- 6 Penyusunan Laporan Keseluruhan tahapan yang telah dilakukan dan hasil dari penelitian yang telah dibahas, kemudian disusun dalam bentuk laporan sistematis.

### **3.2 Flowchart Penelitian**

Suatu kerangka atau diagram alir (flowchart) dari tahapan penelitian dapat mempermudah proses penelitian dan simulasi yang akan dilakukan, menggambarkan flowchart dari tahapan penelitian mengenai simulasi pembakaran pulverized coal dan bahan bakar solar di dalam burner.



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

### 3.3 Tahapan Pemodelan dan Simulasi

Terdapat beberapa variasi percobaan yang akan di simulasikan seperti yang terlihat pada table di bawah ini

Tabel 3.1 Variasi mass flow rate coal dan udara carrier yang akan disimulasikan untuk validasi

Mass flow rate carrier air	Mass flow rate coal
0.1576 kg/s	0.1111 kg/s
0.1381 kg/s	0.0909 kg/s
0.1502 kg/s	0.0903 kg/s

Tabel 3.2 Variasi mass flow rate coal dan udara carrier yang akan disimulasikan untuk menguji performa burner

$\dot{m}$ carrier air (kg/s)	$\dot{m}$ Total air (kg/s)	$\dot{m}$ coal (kg/s)	AFR
0.1754	0.2371	0.079	3
0.1754	0.2371	0.0474	5
0.1754	0.2371	0.0338	7

Untuk melakukan pemodelan dan simulasi terdapat tiga proses beurutan yang perlu dilakukan, diantaranya :

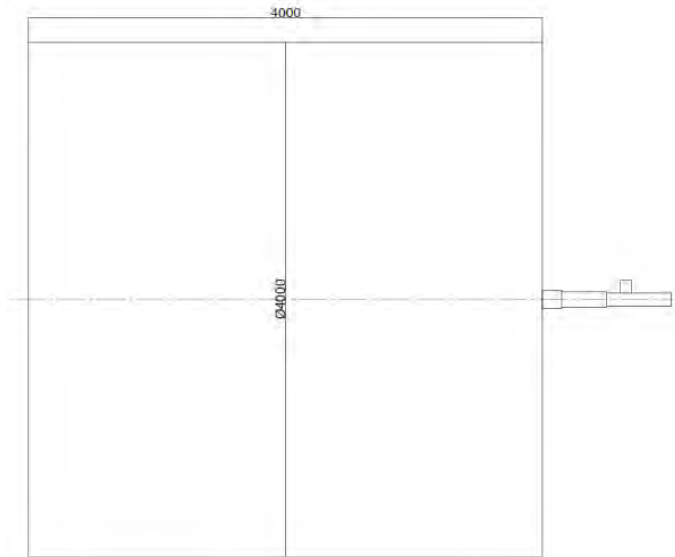
#### 3.3.1 *Pre-processing*

*Preprocessing* merupakan langkah pertama dalam melakukan simulasi numerik. Tahapan ini meliputi beberapa sub-tahapan antara lain: pembuatan geometri, penentuan domain, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan.

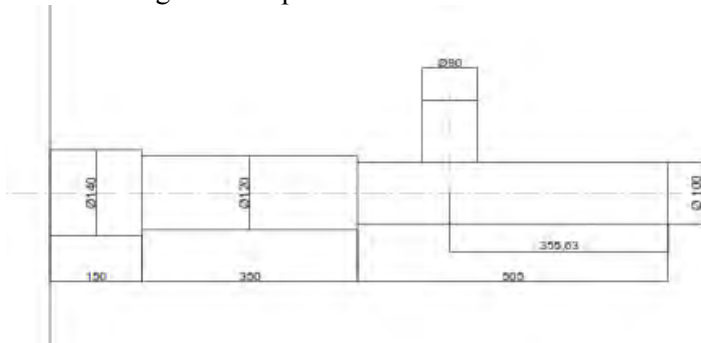
#### **Geometri Burner**

Gambar geometri *burner* dapat dilihat pada gambar dibawah ini. Adapun pengerjaan pembuatan geometri venturi

tersebut dilakukan dengan *software Gambit 2.4.6*, adapun desain geometri burner yang akan dibuat dengan *software Gambit 2.4.6* dapat dilihat pada gambar dibawah ini



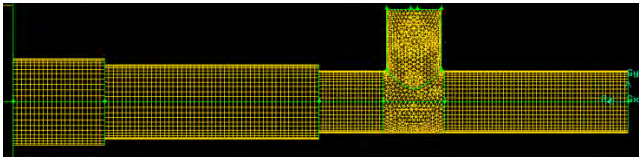
Gambar 3.2 geometri open chamber



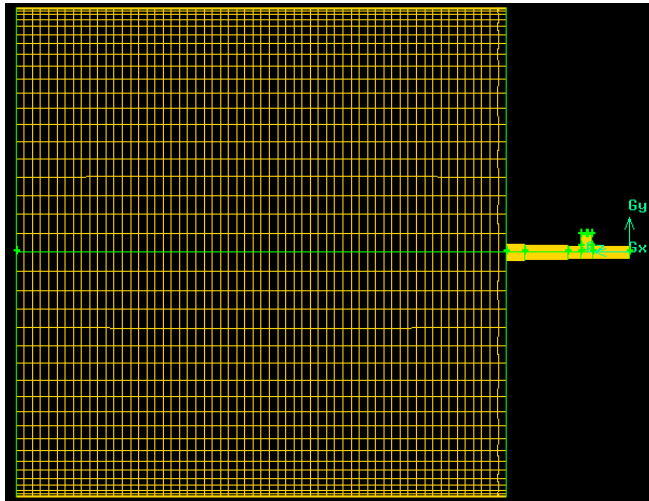
Gambar 3.3 geometri burner

### Meshing

*Meshing* adalah proses pemecahan domain menjadi volume yang lebih kecil. Hal ini dilakukan untuk memudahkan diskritisasi domain aliran dan menerapkan persamaan pengendali pada domain aliran. meshing yang digunakan dalam proses simulasi memiliki jumlah element sebanyak 450128, dengan maksimum skewness 0.749494.

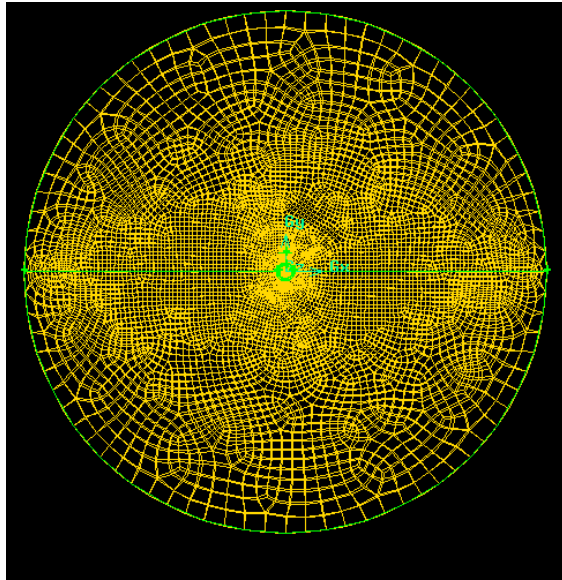


Gambar 3.4. Hasil meshing pada bagian burner tampak samping



Gambar 3.5. Hasil meshing obyek keseluruhan tampak samping





Gambar 3.6 Hasil meshing obyek open chamber tampak depan

### 3.3.2 Processing

merupakan proses kedua dalam simulasi CFD, yakni melakukan simulasi berdasarkan hasil meshing dari domain sistem menggunakan software FLUENT 14.0. Hal yang dilakukan diantaranya mengatur solver models, materials, boundary conditions, operating conditions, control and monitoring conditions, serta initialize conditions. Setelah dilakukan pengaturan, dapat dimulai proses iterasi untuk menyelesaikan simulasi. Berikut di bawah ini merupakan penjelasan lebih lanjut mengenai langkah-langkah dalam processing :

#### 1. Solver Models

- Viscous : Turbulence model yang digunakan adalah k- $\epsilon$  standard, karena model turbulensi ini telah umum digunakan

dalam menganalisa aliran dalam dunia industri maupun pembakaran. Selain itu, model turbulensi k- $\epsilon$  standard dapat mendukung akurasi untuk efek swirl dari udara pembakaran terhadap turbulensi pembakaran.

- Energy: Persamaan energi diaktifkan dalam mendukung penyelesaian heat-transfer maupun efek kompresibilitas aliran terhadap perubahan tekanan dan temperatur.
- Radiation: Model radiasi P-1 diaktifkan untuk mensimulasikan efek radiasi di dalam burner. Penggunaan model radiasi P-1 dapat memberikan hasil yang cukup relevan untuk radiasi dari proses pembakaran. Selain itu, bentuk persamaan radiasi P-1 merupakan persamaan difusi sehingga dapat diselesaikan lebih mudah dengan kapasitas CPU yang rendah.
- Species: Dalam memodelkan reaksi dan difusi dari tiap komponen pembakaran, species model juga diaktifkan. Dalam simulasi ini, species model yang digunakan adalah Non-premixed.

## 2. Materials

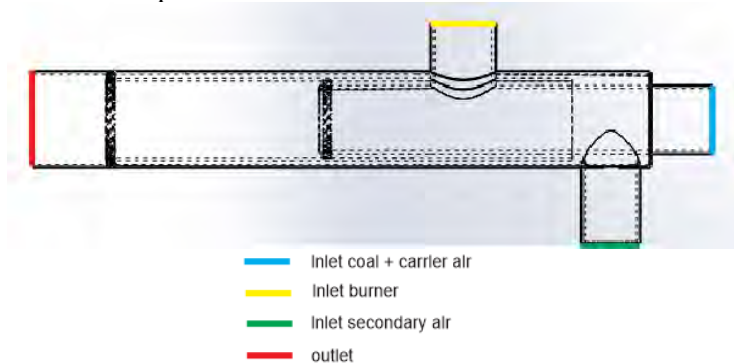
Dalam pengaturan materials, digunakan material mixture- pdf yang telah dibuat berdasarkan look-up PDF table dari kalkulasi fraksi mol dan temperatur komposisi natural gas dan udara. Penggunaan PDF dapat memberikan prediksi nilai enthalpy dari natural gas berdasarkan tiap kondisi mixture fraction selama proses pembakaran dan juga memberikan hasil nyala api pembakaran yang lebih realistis. Selain itu, digunakan material steel untuk material dari dinding burner.

## 3. Operating Conditions

Operating condition digunakan untuk mengatur tekanan operasional di dalam sistem yang disimulasikan. Dalam simulasi ini, tekanan operasional diatur pada tekanan 101325 Pa.

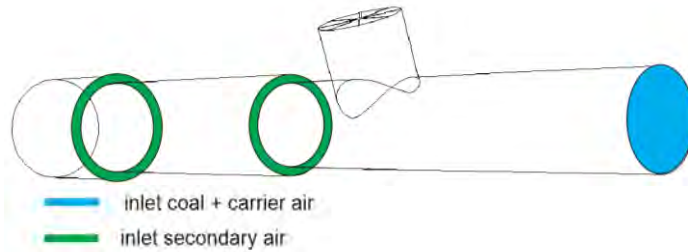
#### 4. Boundary Conditions

Boundary condition adalah batasan batasan kondisi pada domain pemodelan simulasi untuk melakukan pendekatan kepada keadaan aktual



Gambar 3.7 Gambar kondisi aktual burner

Pada gambar 3.7 adalah gambar kondisi aktual burner, bagian berwarna biru adalah inlet primer dimana aliran batubara dan udara carrier keluar menuju saluran primer burner. Bagian berwarna kuning adalah inlet oil burner dimana bahan bakar minyak dan udara keluar dan terbakar, nyala api dari burner tersebut akan masuk ke saluran primer burner. Bagian berwarna hijau adalah inlet secondary air, secondary air masuk melalui selongsong di bagian luar burner, aliran udara dari secondary air ini akan masuk ke dalam burner melalui fin  $60^\circ$  dalam 2 stage yang diharapkan dapat menyempurnakan pembakaran dan mendinginkan dinding burner. bagian berwarna merah adalah outlet burner, api hasil pembakaran dari coal oleh oil burner akan keluar melewati bagian ini menuju open chamber.

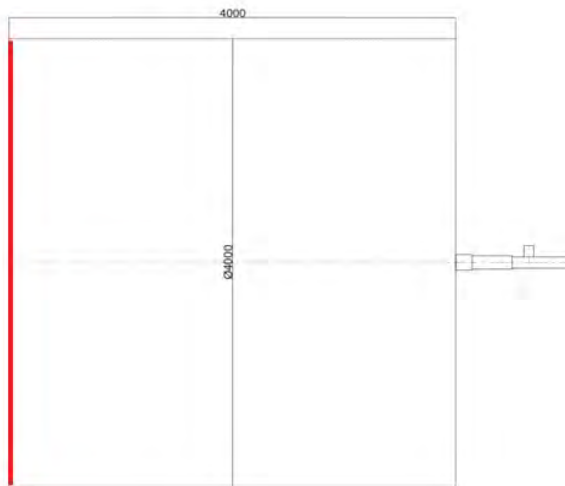


Gambar 3.8 gambar pemodelan geometri burner dalam simulasi

Pada gambar 3.8 adalah gambar permodelan geometri burner yang akan dibuat, beserta beberapa boundary condition nya. Pada daerah berwarna biru adalah inlet coal dan carrier air, pada daerah tersebut akan didefinisikan sebagai mass flow inlet dimana besarnya mass flow akan divariasikan seperti yang telah ditentukan, dengan parameter lain yang ditentukan antara lain pressure, flow direction, temperature, dan mixture fraction. Pada daerah berwarna hijau merupakan pendekatan dari inlet secondary air, dalam kondisi aktual secondary air dengan kecepatan tetap 17,39 m/s akan melewati fin bersudut  $60^\circ$  sehingga arah aliran akan membelok dan membentuk swirl, untuk memodelkan keadaan aktual digunakan boundary condition berupa velocity inlet dengan arah kecepatan axial dan tangensial yang ditentukan sehingga resultannya akan membentuk swirl air  $60^\circ$ , parameter lain yang ditentukan antara lain pressure, temperature, dan mixture fraction.



Pada pemodelan bagian inlet oil burner dibuat boundary condition seperti pada gambar 3.7 dimana bagian berwarna kuning adalah mass flow inlet udara dan bagian biru adalah mass flow inlet diesel fuel, nilai mass flow rate diesel fuel disesuaikan dengan spesifikasi oil burner pada kondisi aktual yaitu 3kg/h atau 0.000833kg/s dan mass flow rate udara oil burner diasumsikan memiliki rasio stoikiometri dengan excess air 3% sehingga menjadi 53.34 kg/h atau 0.01481 kg/s.



Gambar 3.11 gambar permodelan open chamber

Untuk melakukan pengamatan pada nyala api setelah keluar dari mulut burner menuju surrounding perlu dilakukan permodelan open chamber, open chamber yang dibuat memiliki bentuk silinder dengan radius 2 meter dan panjang 4 meter, pada ujung open chamber yang berwarna merah didefinisikan sebagai pressure outlet dengan tekanan 1 atm. Keseluruhan nilai untuk tiap boundary conditions merupakan hasil pengolahan data aktual dan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3.3. Nama *Boundary Condition* Pemodelan Sistem dan Tipenya

<b>Nama <i>Boundary Condition</i></b>	<b>Tip</b>	<b>Keterangan</b>
<b><i>Carrier Air</i></b>	<i>Mass Flow Inlet</i>	$\dot{m}_{Coal}$ : di variasikan $\dot{m}_{Air}$ : di variasikan <i>flow direction: normal to boundary</i> temperatur: 300 K P : 0.004 atm
<b><i>Burner Solar</i></b>	<i>Mass Flow Inlet</i>	$\dot{m}_{Solar}$ : 3 kg/h = 0,001389 kg/s $\dot{m}_{Air}$ : 50,8 kg/h = 0,00222 kg/s <i>flow direction: normal to boundary</i> Temperatur: 300 K P : 0.04 atm
<b><i>Swirl Air</i></b>	<i>Velocity Inlet</i>	V= 17.39 m/s P : 0.008 atm Temperatur: 300 K <i>flow direction: 60°</i>
<b><i>Open Chamber</i></b>	<i>Pressure Outlet</i>	P : 1 atm Temperatur: 300 K

## 5. Monitoring Residual

*Monitor Residual* adalah tahap penyelesaian masalah, berupa proses iterasi hingga mencapai harga *convergence* yang diinginkan. Harga *convergence* ditetapkan sebesar  $10^{-3}$  artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga di bawah  $10^{-3}$ . Namun jika nilai konvergen tetap tidak tercapai maka untuk proses validasi dapat dilakukan pengambilan data pada iterasi tertentu

dimana pada iterasi tersebut memiliki nilai parameter yang hampir sama dengan data OEM.

#### 6. Initialize Conditions

Initialize merupakan nilai awal untuk tiap parameter sebelum proses iterasi dalam simulasi berjalan. Metode inisialisasi yang digunakan adalah standart initialize, untuk mendapatkan nilai parameter awal berdasarkan boundary conditions dari inlet.

#### 7. Iterations

Setelah keseluruhan pengaturan dilakukan, proses simulasi dimulai dengan melakukan iterasi sejumlah 10000 iterasi hingga memenuhi kriteria konvergensi. Kriteria konvergensi ditentukan berdasarkan residual monitoring level yang telah diatur sebelumnya maupun kesetimbangan flux antara inlet dan outlet kurang dari 0.5%.

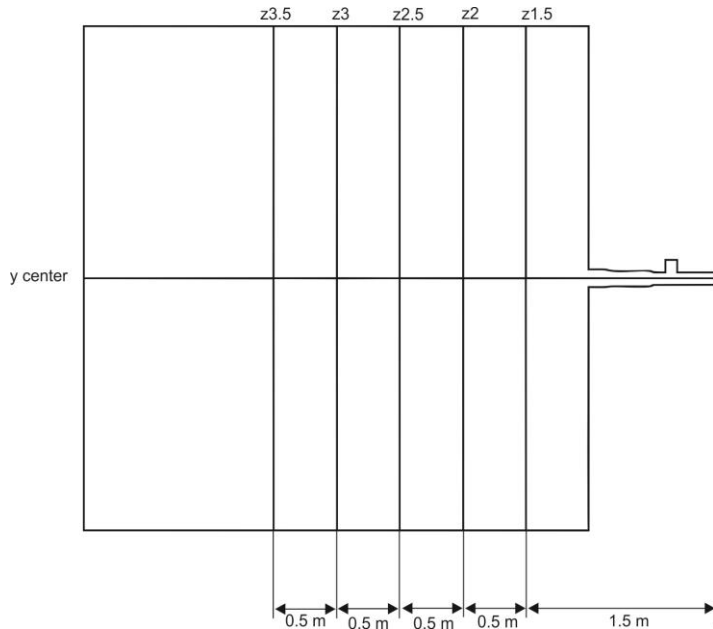
### 3.3.3 Post-processing

Merupakan penampilan hasil serta analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif (kontur, vektor) dan data kuantitatif berupa grafik maupun tabel data. Pada penelitian ini penganalisaan dilakukan terhadap distribusi temperatur (kontur dan grafik), dan distribusi kecepatan (kontur dan vektor)

#### **Metode Pengambilan Data panjang nyala dan *Mass Fraction***

Untuk pengambilan data panjang nyala dan mass fraction gas buang ( $O_2$ ,  $CO_2$  dan  $NO$ ) hasil pembakaran dengan cara pengambilan pada beberapa titik pada profil kontur.





Gambar 3.12 garis observasi temperature dan fraksi massa gas buang

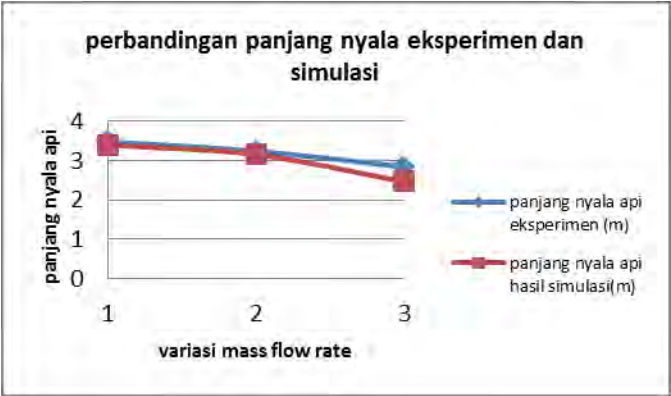
Garis center digunakan untuk melihat panjang nyala api pada hasil simulasi tiap variasi, sedangkan garis vertical z1.5, z2, z2.5, z3 dan z3.5 digunakan untuk pengambilan data mass fraction gas buang .

### 3.4 Validasi

Tahap validasi merupakan tahap membandingkan hasil simulasi CFD terhadap data eksperimen atau empiris. Data validasi didapatkan dari hasil eksperimen, data yang akan dibandingkan yaitu data panjang nyala api dan laju pembakaran antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi.

Tabel 3.4. data validasi hasil simulasi dan eksperimen

mass flow rate carrier air (kg/s)	mass flow rate udara total (kg/s)	mass flow rate coal (kg/s)	AFR	panjang nyala api simulasi (m)	panjang nyala eksperimen (m)	error (%)
0.1489	0.2106	0.0835	2.5	3.85	3.48	10.6
0.1292	0.1909	0.0637	2.9	3.15	3.24	2.27
0.1140	0.1757	0.0497	3.5	2.45	2.84	13.7



Gambar 3.13 grafik perbandingan panjang nyala eksperimen dan simulasi

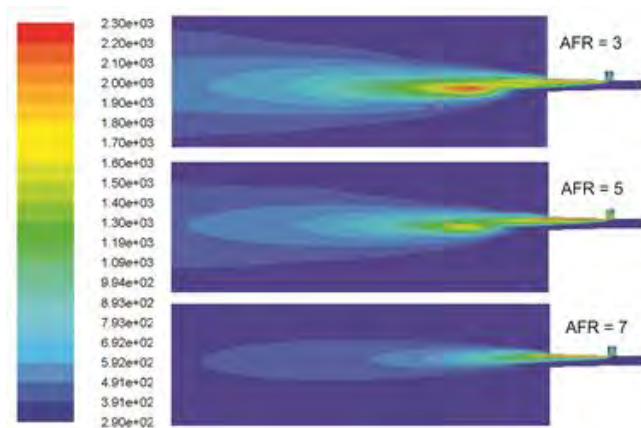
Dari gambar 3.13. dan tabel 3.4. terlihat bahwa panjang nyala api pada pengukuran saat eksperimen dan simulasi memiliki nilai yang berbeda, namun keduanya memiliki trend yang sama, semakin besar mass flow rate udara carrier dibandingkan mass flow rate coal panjang nyala api yang terjadi semakin kecil, hasil simulasi memiliki error terbesar sebesar 13%, dan yang terkecil 2.34%, karena masih dapat ditoleransi maka hasil analisa numeric masih dapat digunakan untuk pengamatan hasil pembakaran pada start up burner yang dirancang.

## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan proses perhitungan dan mencapai konvergensi, data hasil simulasi akan dianalisa. Terdapat beberapa visualisasi yang akan ditunjukkan berupa kontur temperatur, dan polutan ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  dan  $\text{NO}_x$ ). Pada hasil analisa data kali ini ada beberapa kondisi yang telah ditentukan yaitu kecepatan udara *swirl air* tetap sebesar 17.39 dan yang divariasikan adalah mass flow rate udara carrier dan coal, Temperatur dinding dianggap konstan sebesar 300 K, dan tekanan outlet yang diasumsikan sebesar 1 atm.

### 4.1. Analisa Pada Kontur Temperatur

Dibawah ini adalah tampilan visual kontur *temperatur* dari tiap variasi laju alir massa coal dan udara carrier.



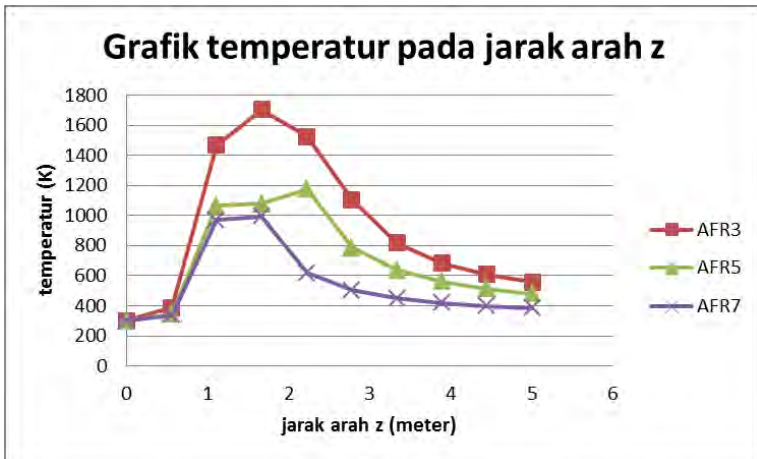
Gambar 4.1. Kontur temperatur pada tiap variasi AFR

Dari kontur temperatur pada gambar 4.1. dapat dilihat bahwa terjadi perubahan warna pada kontur temperatur setelah melewati saluran burner, terjadi peningkatan temperatur yang

signifikan yang terlihat pada perubahan warna kontur dari berwarna biru yang berarti bersuhu rendah menjadi berwarna merah dimana suhu tinggi mencapai 2200 K, hal ini menunjukan terbentuknya api, api ini terbentuk karena terbakarnya batubara yang melewati api dari oil burner, dari kontur temperatur tersebut dapat terlihat bahwa batubara kemudian terus terbakar keluar dari second chamber sampai akhirnya habis di open chamber dan temperaturnya turun. Ada perbedaan kontur antara tiap variasi AFR yang disimulasikan dimana semakin besar AFR maka nyala api semakin pendek dan volume api semakin kecil. Pada kontur temperatur pemodelan dengan AFR 7 terlihat bahwa api dari pembakaran yang terjadi di dalam burner terdesak ke bagian dinding atas, hal ini disebabkan oleh terlalu besarnya perbandingan udara dibandingkan dengan bahan bakar batubara, sehingga aliran udara carrier yang lewat tidak menyempurnakan pembakaran namun mendinginkannya, pada saat keluar dari burner udara dari sekitar mengakibatkan *excess air* semakin bertambah, sehingga nyala api padam karena terlalu banyak *excess air*.

Tabel 4.1 Data panjang nyala api dari tiap variasi AFR

$\dot{m}$ carrier air (kg/s)	$\dot{m}$ Total air (kg/s)	$\dot{m}$ coal (kg/s)	AFR	Panjang nyala api (meter)
0.1754	0.2371	0.079	3	2.23055
0.1754	0.2371	0.0474	5	1.74333
0.1754	0.2371	0.0338	7	0.98755

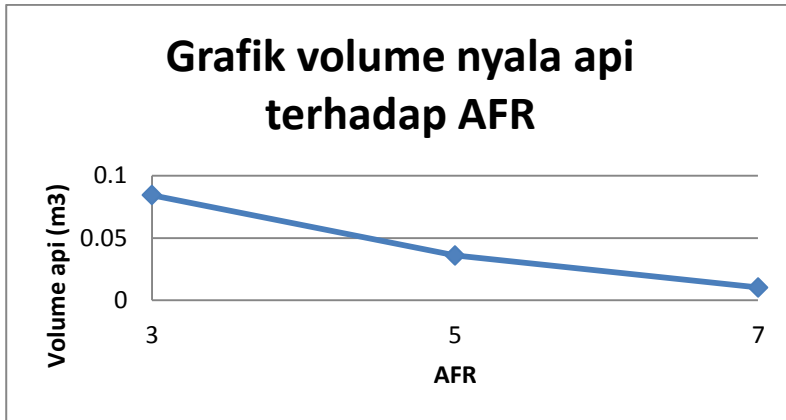


Gambar 4.2 grafik temperatur pada garis y center di tiap variasi AFR

Dari grafik 4.2 dan tabel 4.1 dapat dilihat bahwa pada simulasi pengoperasian start up burner dengan AFR 3 memiliki nyala api yang paling panjang dengan temperatur yang paling tinggi yaitu 2.23055 meter dan suhu maksimal nya mencapai 1756 K, pada pengoprasian dengan AFR 5 memiliki panjang nyala api 1.74333 meter dan suhu maksimal 1198 K, dan yang pada AFR 7 memiliki panjang nyala yang paling pendek sebesar 0.98755 dan temperatur tertinggi nya 996 K ,

Tabel 4.2. Data volume api hasil simulasi temperatur dari variasi AFR

$\dot{m}$ carrier air (kg/s)	$\dot{m}$ Total air (kg/s)	$\dot{m}$ coal (kg/s)	AFR	volume api m <sup>3</sup>
0.1754	0.2371	0.079	3	0.0843352
0.1754	0.2371	0.0474	5	0.0359251
0.1754	0.2371	0.0338	7	0.0102127

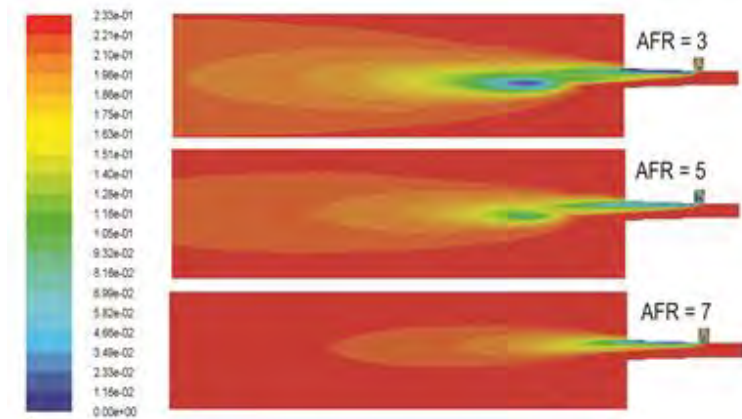


Gambar 4.3. Grafik *Volume Nyala Api* dari variasi laju aliran massa.

Dari trend grafik pada gambar 4.2. yang diambil dari data pada tabel 4.1. dapat kita lihat bahwa terjadi penurunan volume api pada setiap peningkatan perbandingan  $\dot{m}$  udara carrier dengan  $\dot{m}$  coal, Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai laju aliran massa coal mengakibatkan peningkatan nilai volume api karena jumlah coal yang dibakar lebih banyak dan membutuhkan waktu lebih lama, jumlah partikel batubara yang lebih banyak ini juga mengakibatkan lebih banyak sisa batubara yang belum terbakar saat melewati api dari oil burner dan akan terbakar dengan jarak yang lebih jauh daripada dengan jumlah coal yang sedikit, sehingga volume api semakin besar. Dari perbandingan AFR dengan volume api pada variasi yang dilakukan dapat terlihat bahwa semakin besar AFR maka laju pembakaran akan semakin cepat.

#### 4.2. Analisa Pada O<sub>2</sub>

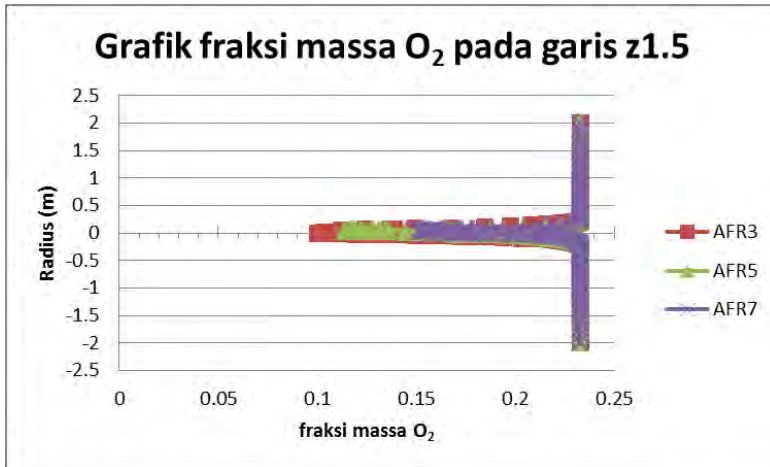
Pada tampilan visual kontur dari *mass fraction* O<sub>2</sub>, diambil pada tiap nilai laju aliran massa *carrier air dan coal*



Gambar 4.4. Kontur fraksi massa *species* O<sub>2</sub> pada tiap variasi AFR

Dari kontur fraksi massa *species* O<sub>2</sub> AFR 3, 5, dan 7 pada gambar 4.4. dapat dilihat terdapat gradasi warna sepanjang *burner sampai open chamber*. Kontur warna O<sub>2</sub> saat sebelum melewati *combuster* solar berwarna merah, hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi oksigen tinggi di bagian tersebut, setelah melewati *combuster* terjadi perubahan warna dari merah ke hijau lalu menjadi biru, kontur warna biru menunjukkan jumlah O<sub>2</sub> menipis, menipis nya O<sub>2</sub> ini diakibatkan oleh adanya reaksi pembakaran, reaksi pembakaran tersebut terjadi karena batubara terbakar oleh api dari burner berbahan bakar minyak solar, proses pembakaran ini membutuhkan oksigen sehingga pada daerah tersebut konsentrasi oksigen mengecil karena terkonsumsi pembakaran. Saat api keluar ke *open chamber* kontur warna perlahan kembali berubah dari biru menjadi merah, perubahan warna tersebut menandakan fraksi massa oksigen di daerah tersebut kembali

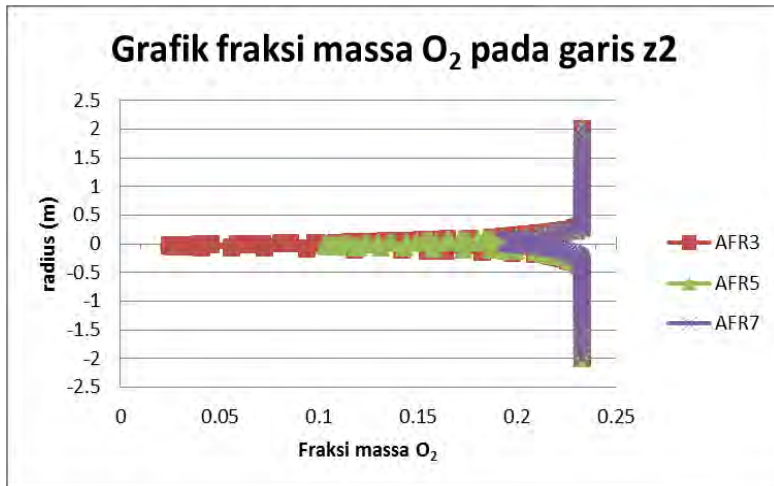
meningkat, dikarenakan batubara sudah habis terbakar dan sudah tidak ada reaksi pembakaran.



Gambar 4.5. Grafik *mass fraction*  $O_2$  pada garis  $z1.5$  terhadap radius open chamber.

Dari trend grafik pada gambar 4.5. yang diambil dari data hasil simulasi. dapat kita lihat bahwa dari ketiga variasi laju aliran massa memiliki tren yang hampir sama, fraksi massa  $O_2$  pada 0 m sumbu y semakin berkurang, hal ini menunjukkan bahwa konsumsi  $O_2$  untuk pembakaran pada daerah tersebut sangat tinggi, grafik pada gambar 4.5. ini diambil pada jarak sumbu  $z$  1.5 meter pada jarak tersebut nyala api baru saja keluar dari ujung mulut burner dan konsumsi oksigen pada AFR 3 paling memiliki fraksi massa oksigen terendah karena pembakaran yang terjadi lebih besar dan mengkonsumsi lebih banyak oksigen, pada AFR 7  $O_2$  yang dikonsumsi paling sedikit karena pembakaran yang terjadi kecil, pada garis  $z1.5$  fraksi massa tiap variasi berada pada kisaran 0.1 - 0.15.

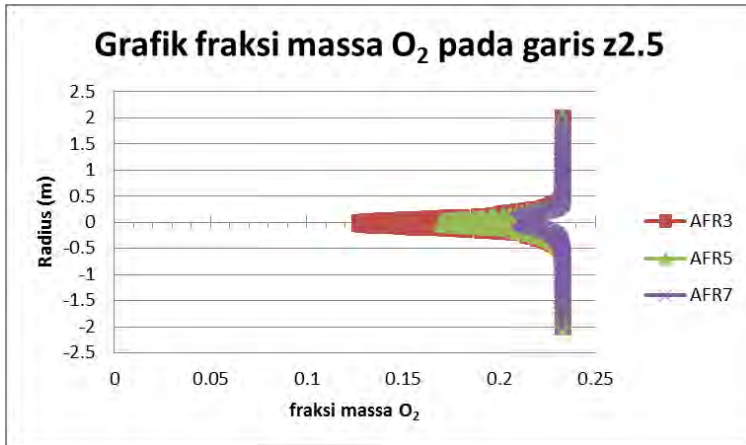




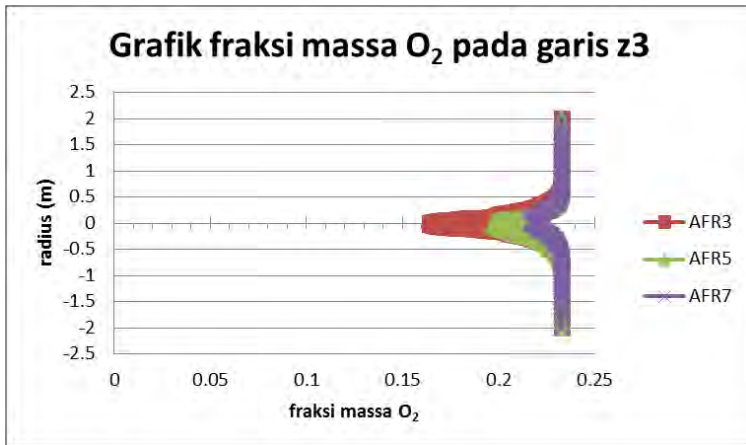
Gambar 4.6. Grafik *mass fraction*  $O_2$  pada garis z2 terhadap radius open chamber.

Grafik pada gambar 4.6. adalah grafik perbandingan konsentrasi massa  $O_2$  pada jarak z 2 meter dari data hasil simulasi. dapat kita lihat bahwa dari ketiga variasi laju aliran massa memiliki tren yang hampir sama, fraksi massa  $O_2$  semakin menipis saat mendekati 0 m sumbu y, hal ini menunjukkan bahwa terjadi pembakaran pada daerah tersebut yang mengkonsumsi  $O_2$ , dari ketiga variasi terlihat bahwa untuk AFR 3 mengkonsumsi  $O_2$  paling banyak, diikuti oleh AFR 5 lalu AFR 7 adalah yang paling sedikit, hal ini dikarenakan pada AFR 3 batubara masih banyak yang belum terbakar pada jarak tersebut karena kekurangan oksigen untuk proses pembakaran, sehingga pada variasi tersebut membutuhkan oksigen yang lebih banyak saat di luar mulut burner, sedangkan pada variasi laju aliran massa yang lain perbandingan udara carrier dan batubara lebih besar sehingga batubara yang belum terbakar lebih sedikit dan oksigen yang dikonsumsi untuk proses pembakaran juga lebih sedikit, pada garis z2 terjadi peningkatan konsumsi pembakaran pada AFR 3 dan 5 dari sebelumnya pada garis z1.5, hal ini dikarenakan pada

AFR 3 dan 5 udara pembakaran dari dalam burner kurang sehingga pembakaran mendapatkan lebih banyak udara saat di open chamber dan pembakaran menjadi lebih baik, sedangkan pada AFR 7 tidak terjadi penurunan konsumsi  $O_2$ , hal ini dikarenakan udara dari dalam burner sudah cukup banyak.



Gambar 4.7. Grafik *mass fraction*  $O_2$  pada garis z2.5 terhadap radius open chamber.

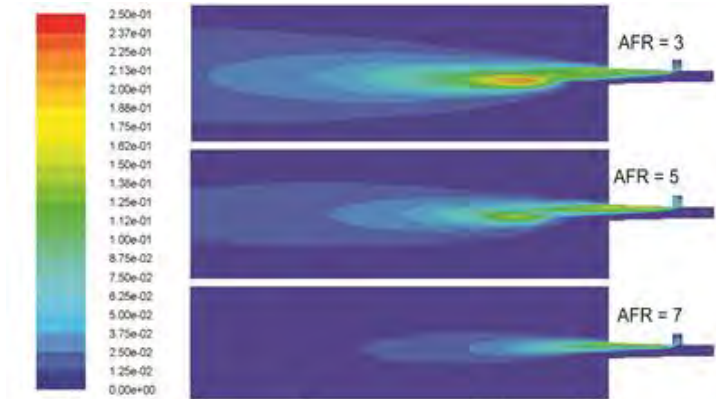


Gambar 4.8. Grafik *mass fraction*  $O_2$  pada garis  $z_3$  terhadap radius open chamber

Grafik pada gambar 4.7. – 4.8. adalah grafik perbandingan konsentrasi massa  $O_2$  pada jarak 2.5 dan 3 meter arah sumbu  $z$  dari data hasil simulasi. dapat kita lihat bahwa ada penurunan jumlah oksigen yang menunjukkan bahwa masih ada proses pembakaran pada jarak tersebut, namun konsentrasi  $O_2$  sudah tidak sekecil saat jarak  $z$  1.5m dan 2 m, hal ini menandakan masih adanya sedikit proses pembakaran pada daerah tersebut. Dari ketiga variasi terlihat bahwa untuk AFR 3 mengkonsumsi  $O_2$  paling banyak, diikuti oleh AFR 5 lalu yang paling kecil adalah AFR 7, hal ini dikarenakan pada AFR 3 batubara masih ada yang belum terbakar pada jarak tersebut karena kurangnya udara untuk proses pembakaran, sedangkan pada AFR 3 perbandingan udara carrier dan batubara lebih besar sehingga sisa batubara yang belum terbakar pada jarak tersebut sedikit dan konsumsi oksigen untuk proses pembakaran juga lebih kecil, dan pada AFR 7  $O_2$  sudah mendekati fraksi massa normal  $O_2$  di udara yaitu 0.23 yang menandakan sudah tidak ada pembakaran pada jarak tersebut

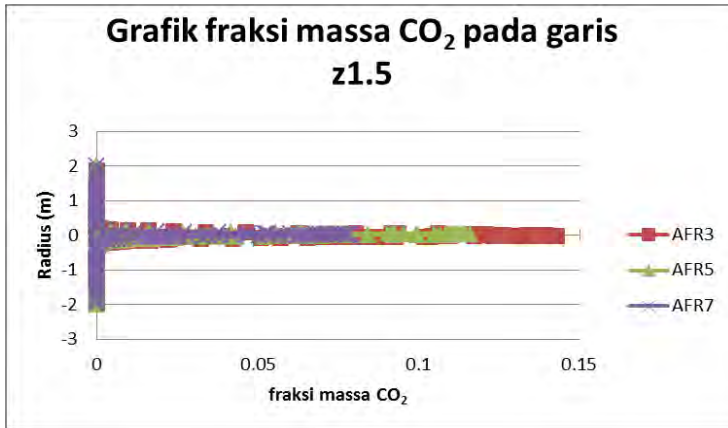
### 4.3. Analisa Pada CO<sub>2</sub>

Pada kontur dari *mass fraction* CO<sub>2</sub>, ditampilkan visualisasi kontur pada tiap nilai laju aliran massa *carrier air dan coal*.



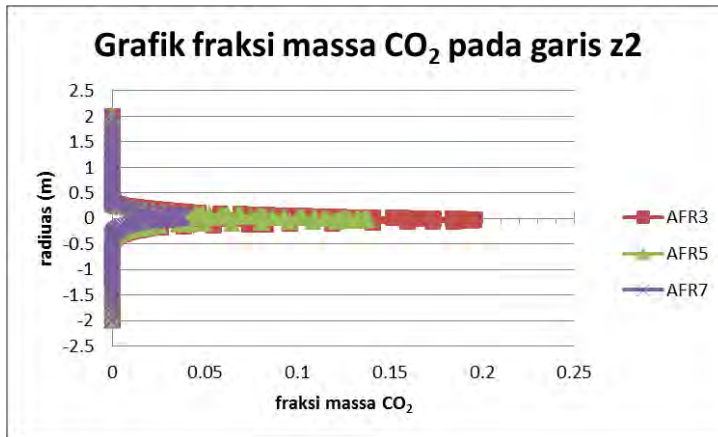
Gambar 4.9. Kontur *mass fraction* CO<sub>2</sub> pada tiap variasi AFR

Dari kontur pada gambar 4.7. – gambar 4.9. dapat dilihat terdapat gradasi warna di sepanjang sistem. Seperti hal nya kontur temperatur, kontur mass fraction CO<sub>2</sub> mulai terlihat berubah warna dari yang sebelumnya biru menjadi merah, kontur berwarna biru tua menunjukkan bahwa fraksi massa CO<sub>2</sub> bernilai kecil dan mendekati 0, setelah melewati combustor solar kontur fraksi massa CO<sub>2</sub> berubah warna secara bertahap menjadi merah, perubahan warna ini menunjukkan terjadinya peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> diakibatkan oleh proses pembakaran yang menghasilkan CO<sub>2</sub>. Dari kontur tersebut terlihat bahwa setelah keluar ke open chamber fraksi massa CO<sub>2</sub> berkurang secara bertahap, berkurangnya CO<sub>2</sub> tersebut dikarenakan proses pembakaran yang berkurang .



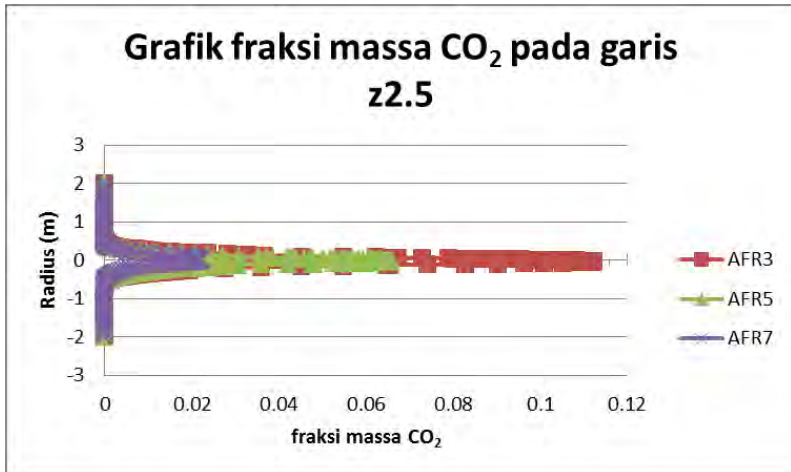
Gambar 4.10. Grafik *mass fraction* CO<sub>2</sub> pada garis z1.5 terhadap radius open chamber.

Grafik pada gambar 4.12. menunjukkan fraksi massa CO<sub>2</sub> pada jarak 1.5 m di sumbu z yang diambil dari data hasil simulasi yang dilakukan, pada grafik tersebut terlihat bahwa trend grafik dari fraksi massa CO<sub>2</sub> pada jarak 1.5m ketiga variasi yang dilakukan menunjukkan kemiripan, pada jarak pengambilan data tersebut nyala api baru saja keluar dari mulut burner sehingga pada ketiga variasi tersebut batubara yang terbakar menghasilkan CO<sub>2</sub> dengan jumlah yang hampir sama.

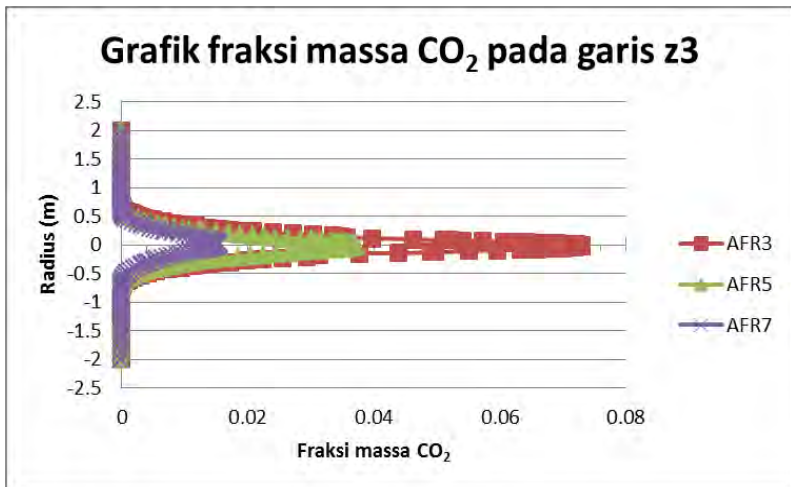


Gambar 4.11. Grafik *mass fraction* CO<sub>2</sub> pada garis z2 terhadap radius open chamber.

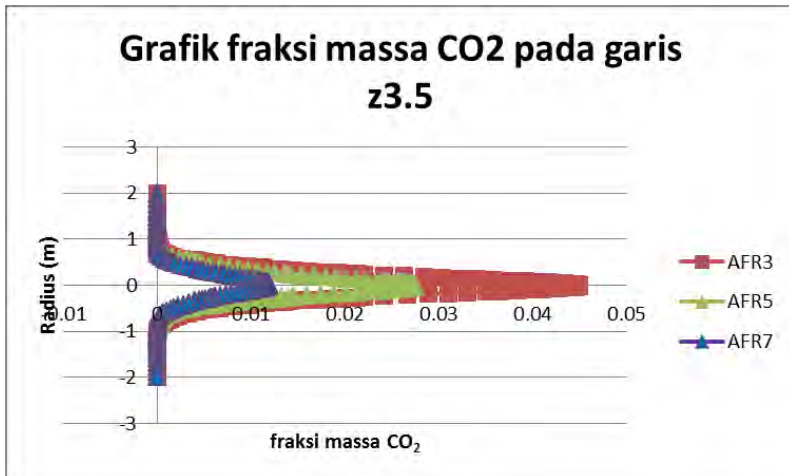
Grafik pada gambar 4.13. menunjukkan fraksi massa CO<sub>2</sub> pada jarak 2 m di sumbu z yang diambil dari data hasil simulasi yang dilakukan, pada grafik tersebut terlihat bahwa trend grafik dari fraksi massa CO<sub>2</sub> masih hampir sama seperti pada jarak 1.5m, ketiga variasi yang disimulasikan menunjukkan kemiripan, namun konsentrasi CO<sub>2</sub> pada laju aliran massa batubara 0.0497 lebih rendah daripada variasi yang lain, hal ini disebabkan pembakaran batubara yang terjadi di variasi dengan laju aliran massa batubara 0.0497 tidak sebanyak yang terjadi di variasi lainnya, karena sisa batubara yang belum terbakar lebih sedikit.



Gambar 4.12. Grafik *mass fraction*  $\text{CO}_2$  pada garis z2.5 terhadap radius open chamber



Gambar 4.13. Grafik *mass fraction*  $\text{CO}_2$  pada garis z3 terhadap radius open chamber.



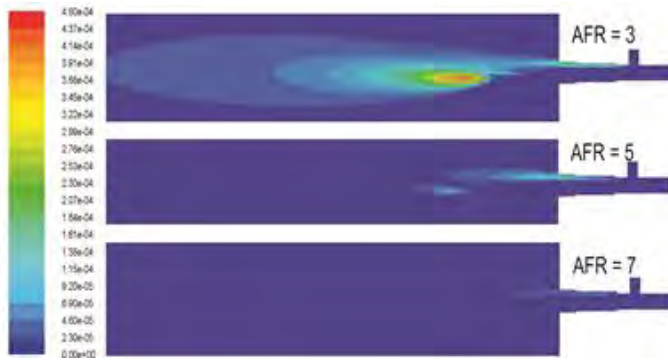
Gambar 4.14. Grafik *mass fraction*  $\text{CO}_2$  pada garis  $z3.5$  terhadap radius open chamber.

Pada grafik di gambar 4.14. menunjukkan fraksi massa  $\text{CO}_2$  pada jarak 3 m di sumbu  $z$  yang diambil dari data hasil simulasi yang dilakukan, dari grafik tersebut terlihat bahwa fraksi massa  $\text{CO}_2$  sudah tidak sebanyak pada jarak 1.5 meter dan 2 meter, hal ini dikarenakan proses pembakaran yang sudah mulai berkurang karena sisa batubara yang belum terbakar tinggal sedikit.

#### 4.4. Analisa Pada Pollutan NO

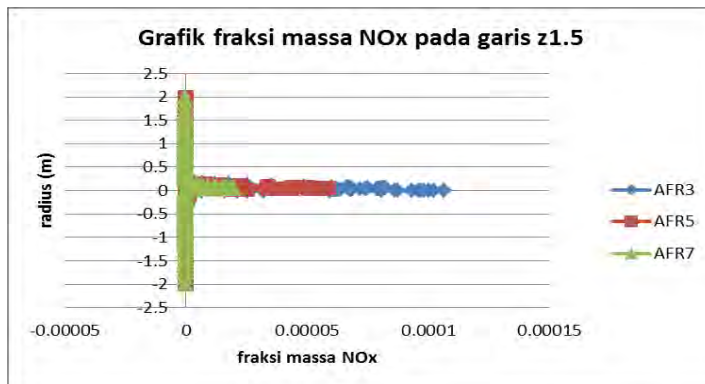
Pada tampilan visual kontur dari *Pollutant NO*, diambil pada tiap nilai laju aliran massa *carrying air dan coal*.



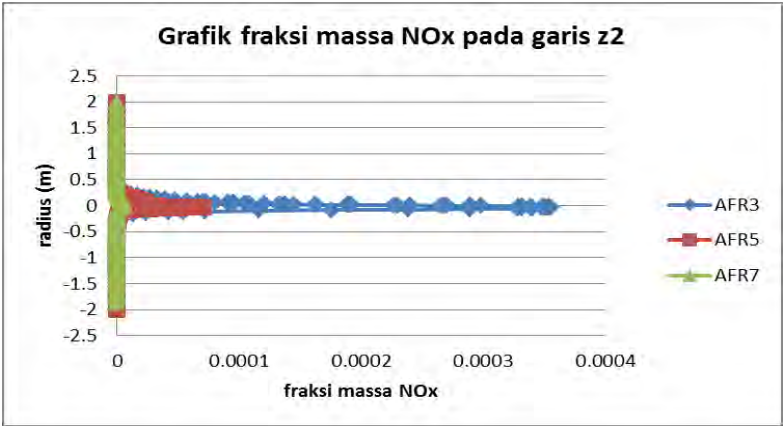


Gambar 4.15 Kontur *mass fraction pollutant NO* pada tiap variasi *mass flow rate coal* dan udara

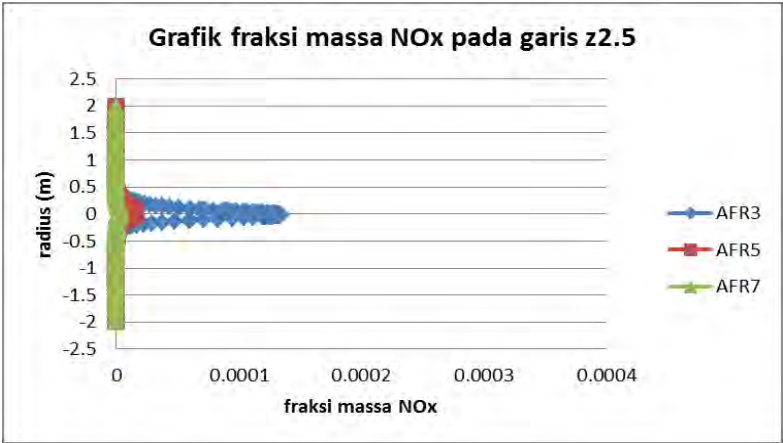
Dari kontur *pollutant NO* pada gambar 4.15. dapat dilihat terdapat kenaikan kontur warna *pollutant no* sepanjang *chamber* sampai *open chamber*. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat pengaruh laju aliran massa carrying air terhadap kesempurnaan pembakaran. Semakin kecil laju aliran massa carrying air semakin tinggi warna kontur *pollutant no* yang ditampilkan.



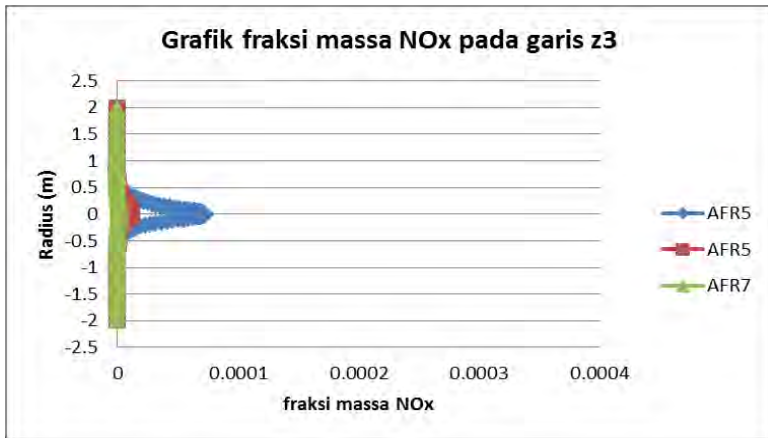
Gambar 4.16 Grafik *mass fraction NOx* pada garis *z1.5* terhadap radius open chamber.



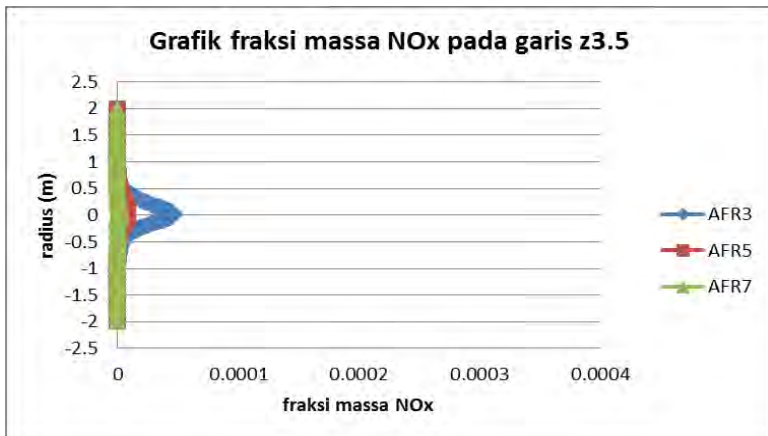
Gambar 4.17 Grafik *mass fraction* NOx pada garis z2 terhadap radius open chamber.



Gambar 4.18. Grafik *mass fraction* NOx pada garis z2.5 terhadap radius open chamber



Gambar 4.19 Grafik *mass fraction* NOx pada garis z3 terhadap radius open chamber



Gambar 4.20 Grafik *mass fraction* NOx pada garis z3.5 terhadap radius open chamber

Dari trend grafik pada gambar 4.16. sampai 4.20. yang diambil dari data hasil simulasi dapat dilihat bahwa semakin jauh

jarak sumbu z semakin turun pula kadar NO<sub>x</sub> yang terbentuk, hal ini dikarenakan terbentuknya NO<sub>x</sub> membutuhkan panas dari pembakaran, NO<sub>x</sub> terbentuk karena oksigen dan nitrogen bereaksi pada suhu tinggi, sedangkan semakin jauh jaraknya pada sumbu z nyala api semakin kecil, hal ini mengakibatkan produksi NO<sub>x</sub> juga berkurang. Penurunan nilai fraksi massa *pollutant* NO juga terjadi pada setiap penurunan laju aliran massa *coal dan carrying air*, hal itu berlaku untuk setiap variasi mass flow rate udara dan coal yang ditentukan. Hal ini terjadi karena meskipun laju aliran massa dari carrying air dan coal menurun namun laju aliran massa swirl air yang diberikan tetap, sehingga perbandingan udara dengan batu bara yang dibakar lebih besar, sehingga pembakaran lebih sempurna. *Pollutant* NO<sub>x</sub> terjadi karena bahan bakar kekurangan asupan O<sub>2</sub>.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari penelitian “Studi Numerik Karakteristik Pembakaran Pada Rancangan *Start Up Burner dengan variasi laju aliran massa carrier air dan coal*” didapatkan beberapa kesimpulan, yaitu :

1. simulasi menggunakan Software ANSYS 15.0 sudah cukup baik menggambarkan proses pembakaran yang terjadi di burner rancangan dalam penelitian tugas akhir ini.
2. Simulasi numerik memperoleh hasil validasi yang cukup baik dengan nilai error temperatur terkecil 2,34% pada variasi mass flow rate carrier air 0.1489 kg/s dengan mass flow rate coal 0.0835 kg/s dan nilai error terbesar 13,22% pada *variasi* mass flow rate carrier air 0.1140 kg/s dengan mass flow rate coal 0.0497 kg/s.
3. Volume nyala api terbesar adalah pada pengoperasian burner dengan AFR 3 dengan mass flow rate carrier air 0.1754 kg/s dan coal 0.2371 kg/s dengan volume 0.0843352 m<sup>3</sup> dan volume terkecil adalah pada *variasi* AFR 7 dengan mass flow rate carrier air 0.1754 kg/s dengan mass flow rate coal 0.0338 kg/s dengan volume 0.0102127 m<sup>3</sup>.
4. Dari hasil simulasi numerik kandungan NOx terkecil adalah pada *variasi* AFR 7 dengan mass flow rate carrier air 0.1754 kg/s dengan mass flow rate coal 0.0338 kg/s.
5. *variasi* mass flow rate dengan AFR lebih direkomendasikan karena memiliki nilai temperatur maksimal yang cukup besar yaitu 1170 K, selain itu pada variasi ini memiliki emisi Nox yang cukup kecil, dan emisi CO<sub>2</sub> cukup besar.

## 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan diharapkan berguna untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlunya kelengkapan alat untuk pengambilan data jarak dan temperatur saat eksperimen untuk mendapatkan data yang lebih valid.
2. Perlu dilakukan penelitian lagi dengan menambahkan variasi pada AFR, dengan mengatur mass flow rate carrier air, coal, dan oil burner sehingga didapatkan pembakaran yang paling baik

## DAFTAR PUSTAKA

1. Zengqi Li, 2009 dkk 2009. *“Bituminous coal combustion in a full-scale start-up ignition burner: Influence of the excess air ratio”*
2. Chunlong Liu dkk 2010. *“Influence of coal-feed rates on bituminous coal ignition in a full-scale tiny-oil ignition burner”*
3. Nasser shelil 2009. *“Flashback studies with premixed swirl combustion”*. Cardiff school of engineering, Institute of energy, cardiff university
4. Sa’adiyah, Devy Setiorini 2013. *“Studi Numerik Karakteristik Aliran, Pembakaran dan Emisi Gas Buang pada Tangentially Fired Boiler 625 MWe dengan Komposisi Batubara 70% LRC dan 30% MRC pada Kondisi Pengoperasian yang Berbeda”*. Jurusan Teknik Mesin ITS
5. <http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=id>
6. <http://forum.bulk-online.com/showthread.php?24123-Solids-Loading-Ratio-%28SLR%29>